Elettronica e telecomunicazioni

Anno LV
Numero 3
Dicembre 2006

Editoriale

Olografia: principi ed esempi di applicazione

HDTV: sessione per la realizzazione di sequenze di test

La sperimentazione Rai a Torino: il riconoscimento all'ibc 2006

Interfacce video

Edizione ottimizzata per la stampa.
La rivista è disponibile su web
alla URL www.crit.rai.it/eletel.htm

Anno LV
N° 3
Dicembre 2006

Rivista quadrimestrale a cura della Rai

Indice

Editoriale 3
di G.F. Barbieri

Olografia: principi ed esempi di applicazioni 7
di M. Muratori

HDTV: sessione per la realizzazione di sequenze di test 31
di G. De Biase e M. Visca

45° - Il Laboratorio Ricerche 36

La sperimentazione Rai a Torino il riconoscimento all'IBC2006 37

Interfacce video (SDI, SDTI, ASI, HD-SDI, DVI, HDMI) 39
di M. Barbero e N. Shpuza

SAT-expo ed Expo-bit 52

Editoriale

ing. Gianfranco **Barbieri**
Direttore di
"Elettronica e
Telecomunicazioni"

Quarantacinque anni spesi bene: questo potrebbe essere il titolo di un ipotetico articolo in cui venisse illustrata l'ampia gamma di risultati conseguiti in altrettanti anni di attività del Centro Ricerche Rai (attualmente Centro Ricerche ed Innovazione Tecnologica). E' ricorso infatti quest'anno il 45° anniversario della sua inaugurazione avvenuta il 2 febbraio 1961.

Erano anni di intenso sviluppo industriale: la maggior parte dei paesi europei aveva ormai superato la fase di ricostruzione e risanamento dalle conseguenze della guerra; l'Italia stava lentamente acquisendo una posizione di rilievo nel contesto internazionale e si cominciava timidamente a parlare di "miracolo economico".

1958 - La nuova sede del Laboratorio Ricerche Rai è in costruzione.

da La Stampa (1 feb. '61)

Domani in via Del Carretto e in corso Giambone

La Rai-tv inaugura a Torino due importanti centri di lavoro

Una sezione elettronica per i servizi amministrativi ed un laboratorio di ricerche al fine di migliorare la ricezione dei programmi

Due importanti centri di lavoro saranno inaugurati domani, giovedì, a Torino, entrambi connessi con le crescenti fortune e attività della Radiotelevisione Italiana.

da La Gazzetta del Popolo (2 feb. 1961)

Il centro elettronico Rai-tv e il laboratorio di ricerche

Due opere all'avanguardia della tecnica, due strumenti di progresso - Stamane la solenne cerimonia di inaugurazione

da Il Giornale del Mattino (2 feb. 1961)

Alla RAI-TV il più moderno «laboratorio ricerche» d'Europa

da Il Popolo (6 feb. 1961)

Il nuovo laboratorio di ricerche inaugurato alla RAI di Torino

Si tratta del più grandioso e moderno complesso europeo

1961 - Alcuni dei titoli relativi alla notizia dell'inaugurazione a Torino, il 2 febbraio, del Centro Elettronico e del Laborario Ricerche della Rai.

Le telecomunicazioni giocavano un ruolo di eccellenza nel fungere da fattore di sviluppo e la RAI, Concessionaria del servizio pubblico di radiodiffusione, era impegnata nel grande sforzo tecnologico di ammodernare e potenziare le sue reti.

Le problematiche relative allo sviluppo ed alla messa a punto degli impianti erano quanto mai sfidanti; l'industria nazionale di settore era alle prime armi, le tecniche di misura e di manutenzione a livello pionieristico, la stabilità e l'affidabilità degli apparati precaria.

Le conoscenze dei fenomeni radioelettrici che stavano alla base del sistema radiotelevisivo richiedevano il supporto di personale altamente specializzato nel campo specifico della radiodiffusione e pertanto i vertici aziendali avevano sentito la necessità di convertire, attraverso una complessa evoluzione, il proprio Laboratorio (costituito a Torino dall'EIAR nel 1930), ove già operavano tecnici di alto livello professionale, in un moderno centro di ricerca e sperimentazione.

1967 - Ricercatori e tecnici presso il Centro Ricerche.

Da allora i principali processi di innovazione che hanno coinvolto il sistema radiotelevisivo hanno visto il Centro in prima linea: la sperimentazione che ha portato alla scelta in Italia del sistema di TV a colori, la TV satellitare, il Televideo, la digitalizzazione dell'audio e del video, la TV ad Alta Definizione; il tutto attraverso un ventaglio di attività svolte nel quadro dei propri compiti istituzionali: la ricerca sulle nuove tecnologie applicate alla produzione, trasmissione e diffusione radiotelevisiva e multimediale; la presenza attiva nelle sedi internazionali ove sono trattate le tematiche relative all'evoluzione tecnologica, in base alle quali vengono effettuate le grandi scelte di politica industriale; il collegamento preferenziale con Enti di ricerca e industria professionale e "consumer" esercitando una funzione traente e pilota per i nuovi prodotti e servizi: tutto ciò, in particolare, attraverso la partecipazione a progetti internazionali finanziati.

1964 - Mezzi attrezzati per la sperimentazione delle riprese per la TV a colori presso il Laboratorio Ricerche

Editoriale

A testimonianza della considerazione internazionale guadagnata sul campo dai suoi ricercatori sono stati tributati nel corso degli anni importanti riconoscimenti. I contributi nel campo dello sviluppo delle tecnologie e della attività di standardizzazione relative ai sistemi di codifica e trasmissione, per la televisione a definizione standard e per l'alta definizione, sono stati premiati, ad esempio, nel 1991, con la *Montreux Achievement Golden Medal* e, nel 1994, con l'*IBC John Tucker Award*. Ultimo riconoscimento, in ordine di tempo, in occasione dell'*Innovation Judges Award,* di cui si dà notizia in questo numero.

Le linee guida che hanno finora ispirato l'attività del Centro trovano oggi ulteriori motivazioni nel contesto di una rivoluzione tecnologica che non accenna a rallentare. Gli articoli pubblicati in questo numero forniscono un quadro eloquente della direzione in cui si sta muovendo.

L'olografia, teorizzata una sessantina di anni fa dal suo inventore (lo scienziato ungherese Dennis Gabor) come strumento per migliorare la risoluzione dei microscopi elettronici, sta diventando una tecnologia matura in un certo numero di campi di applicazione; nel campo della visualizzazione si intravedono certe prospettive per quanto attiene alla riproduzione di immagini tridimensionali, a fronte, tuttavia di problemi tecnici ad oggi tutt'altro che trascurabili.

Le schede sulle sequenze di test per HDTV e sulle interfacce video ci riportano al contesto della partecipazione del Centro alle attività degli organismi internazionali; di particolare rilevanza è il riferimento al progetto tecnico dell'EBU mirato allo sviluppo di metodologie per la valutazione dei diversi formato di compressione proposti per i futuri ambienti di produzione HDTV.

OLOGRAFIA

principi ed esempi di applicazioni

ing. Mario Muratori
Rai - Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica

Sommario
Nel campo della visualizzazione tridimensionale, l'olografia riveste un'importanza particolare poiché è l'unica tecnologia capace di riprodurre immagini reali e virtuali veramente tridimensionali, nel senso che è in grado di riprodurre l'andamento della superficie emittente dell'oggetto nelle tre dimensioni spaziali.
Oggigiorno le applicazioni dell'olografia sono numerose, anche se non sempre spettacolari: un esempio sono i sigilli anticontraffazione.
Invece, la televisione olografica sembra ancora piuttosto lontana.
Infatti, anche progetti molto avanzati, in particolare giapponesi, si propongono di ottenere sistemi per la visualizzazione tridimensionale vera, ma – si noti - non necessariamente olografica, non prima di 15-20 anni.
In questo periodo di tempo, altre tecniche di visualizzazione tridimensionale, in particolare la stereoscopia, avranno la possibilità di affermarsi prima di essere superate da sistemi più avanzati.

1. Introduzione

Olografia è una parola composta dai termini *olo-* e *–grafia*. Il primo, usato come prefisso, deriva dal greco olos, olo-, "tutto" e ha significato di tutto, intero, totale o interamente. Il secondo termine, usato come suffisso, deriva dal greco *–grafia*, a sua volta derivato da *grafo*, "scrivere", e significa *scrittura, disegno, descrizione, trattato* e similari.

Pertanto il termine olografia indica un metodo di descrizione, grafica o iconografica, completa di un oggetto.

Teorizzata nel 1947 dallo scienziato ungherese Dennis Gabor (Gábor Dénes) (Budapest, 1900 - Londra 1979) come metodo per aumentare la risoluzione dei microscopi elettronici, fu da questo battezzata con il termine "olografia", precedentemente tecniche simili si indicavano con la locuzione descrittiva "ricostruzione di fronti d'onda". Per questa invenzione Gabor ottenne il premio Nobel nel 1971.

L'olografia di Gabor era limitata all'uso di pellicole fotografiche illuminate con lampade al mercurio, a quei tempi la migliore sorgente di luce coerente.

Gli ologrammi così ottenuti contenevano però distorsioni e immagini spurie a causa della scarsa coerenza della luce prodotta dalle sorgenti allora disponibili, e quindi l'olografia non ebbe sviluppi significativi fino agli anni sessanta, quando apparve il laser che è una sorgente di luce monocromatica altamente coerente, l'ideale per l'olografia ottica.

E. Leith e J. Upatnieks, negli Stati Uniti, si resero conto che l'olografia poteva essere usata come strumento per la riproduzione di immagini tridimensionali ed effettuarono esperimenti in questo senso, presentando nel 1964 i primi ologrammi, che erano del tipo *a trasmissione*[Nota 1], dai quali si otteneva un'immagine tridimensionale con l'illuminamento obliquo della lastra, procedimento poi diventato "classico".

Intanto, in Unione Sovietica, dal 1958 il sovietico Y. Denisyuk effettuava analoghi esperimenti, pubblicandone i risultati nel 1962; successivamente, sviluppò la tecnica degli *ologrammi a riflessione*[Nota 2] a luce bianca che potevano essere riprodotti utilizzando una normale lampada ad incandescenza, da cui la locuzione "luce bianca".

Un altro tipo di ologramma, sviluppato nel 1968 da S.A. Benton presso il MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), è l'*ologramma iridescente a trasmissione* che si può guardare in luce bianca ed è oggigiorno molto usato per i sigilli di sicurezza. Nonostante le apparenze, è un ologramma del tipo a trasmissione poiché il raggio di riferimento viene generato riflettendo, tramite una pellicola di alluminio, la luce entrante nel supporto trasparente e attraversa l'ologramma per giungere all'osservatore.

L'olografia non è ristretta al solo campo ottico: i suoi principi sono stati infatti applicati con successo anche ad altre applicazioni basate su fenomeni ondulatori coerenti.

Nel campo ultrasonico acustico, per esempio in alcuni tipi di sonar, e delle microonde elettromagnetiche, per esempio i radar CW (*Continuous Wave*) e i SAR (*Synthetic Aperture Radar*), vi sono applicazioni sviluppate sulla base di concetti fisici e di metodi matematici completamente diversi dall'olografia che hanno avuto notevoli sviluppi grazie all'interpretazione dei fenomeni secondo i principi dell'olografia ottica, in particolare, considerando i segnali da trattare, in genere prodotti da battimenti e sovrapposizioni di segnali coerenti, come ologrammi risultanti da interferenze.

Oltre all'olografia acustica e all'olografia nel campo delle microonde, si segnala anche l'olografia elettronica, dove si sfruttano le onde elettroniche al posto di quelle luminose. L'olografia elettronica fu inventata dallo stesso Gabor per incrementare la risoluzione e abolire le aberrazioni del microscopio elettronico a trasmissione. Al giorno d'oggi è utilizzata anche per studiare i campi magnetici nelle pellicole sottili e può essere applicata alla litografia olografica[Nota 3].

2. L'olografia "tradizionale"

Il termine coniato da Gabor si riferisce ad una tecnologia ottica basata sul fenomeno dell'interferenza, che permette la registrazione e la riproduzione di immagini tridimensionali impiegando un fascio di luce coerente [1].

Nota 1 - I primi ologrammi erano del tipo detto *a trasmissione*. Per la loro riproduzione necessita un fascio di riferimento costituito da luce coerente, l'osservatore è posto dalla parte opposta di questo fascio rispetto all'ologramma, e può osservare l'immagine virtuale attraverso la lastra olografica, oppure, rivoltando la lastra, l'immagine reale che si forma tra l'ologramma e l'osservatore.
Nota 2 - Gli ologrammi *a riflessione* si chiamano così poiché la sorgente di luce necessaria alla loro riproduzione è posta dallo stesso lato dell'osservatore, e viene riflessa all'indietro, verso l'osservatore, all'interno del supporto olografico.
Nota 3 - La litografia *olografica* o *ad interferenza* è una tecnica atta a generare schiere regolari di strutture fini senza ricorrere a sistemi ottici complessi o a maschere.

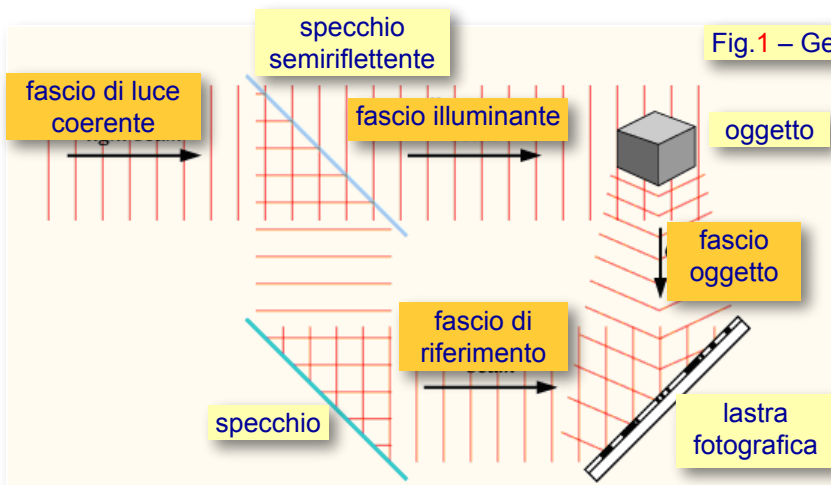



Fig.1 – Generazione di un ologramma.

Le figure 1 e 2, nonché alcune parti del capitolo 2 sono stati estratti da Wikipedia [www.wikipedia.org], sotto la voce "holography", e sono utilizzati sotto la licenza GNU Free Documentation Licence.

Fig. 2 – Riproduzione di un ologramma

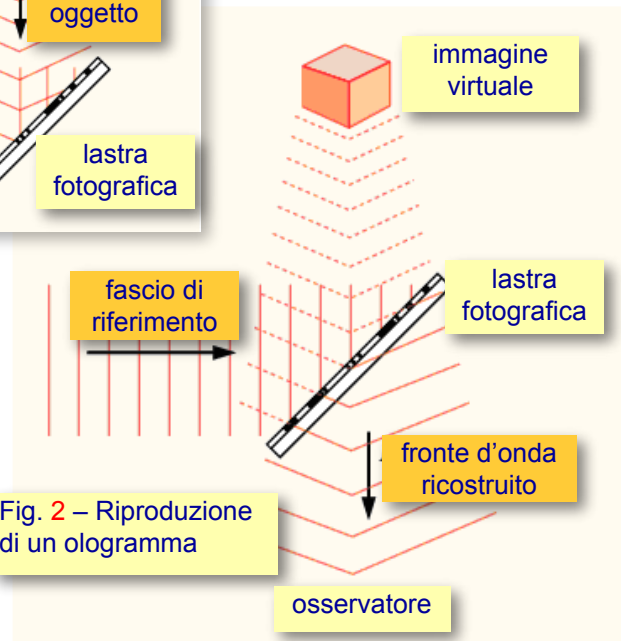
La tecnica prevede due passi distinti, perciò descritti separatamente.

2.1 La generazione dell'ologramma

Il fascio luminoso generato da una sorgente coerente, nel caso considerato un laser, viene formato e diviso tramite specchio semiriflettente, prisma o apparecchiature simili, al fine di ottenere due fasci luminosi tra loro coerenti.

Uno dei due fasci costituisce il *fascio* o *raggio di riferimento*. L'altro viene proiettato verso l'oggetto, generando - per riflessione, diffusione, trasmissione o diffrazione - il *fascio* o *raggio oggetto*.

I due fasci, quello di riferimento e quello oggetto, vengono fatti convergere in una zona dove, grazie alla loro coerenza, si generano fenomeni di interferenza, caratterizzati da una distribuzione spaziale di zone chiare e scure, risultato, rispettivamente, dell'interferenza costruttiva e di quella distruttiva.

Ponendo in tale zona una lastra di materiale sensibile, per consuetudine una lastra fotografica particolare[Nota 4], questa viene impressionata in proporzione all'intensità luminosa spazialmente presente, così memorizzando il prodotto dell'interferenza tra i due fasci luminosi in quello che viene chiamato ologramma.

Lo schema di generazione dell'ologramma è illustrato in figura 1.

2.2 La riproduzione dell'ologramma

In fase di riproduzione, l'ologramma viene illuminato con un fascio laser avente la stessa angolazione adottata per il fascio di riferimento utilizzato in fase di generazione, come illustrato in figura 2. Per comodità anche il fascio utilizzato in riproduzione viene chiamato *fascio di riferi-*

Nota 4 - L'emulsione fotografica deve avere sensibilità per la luce emessa dal laser. Inoltre, la lastra fotografica deve avere caratteristiche dimensionali e meccaniche appropriate, per esempio deve essere ad elevata planarità, e non deve essere troppo spessa per evitare i fenomeni indesiderati – la diffrazione di Braggs - che si generano in volumi "spessi". Si noti che sebbene la lastra fotografica sia un supporto comunemente usato anche per la semplicità d'uso, sono utilizzati anche altri materiali quali: nastro vinilico, termoplastiche, cristalli elettroottici, pellicole ferromagnetiche, fotopolimeri,

Fig. 3 – Esempio di immagine virtuale ottenuta da ologramma a trasmissione a) e geometria per la riproduzione dell'immagine virtuale b)

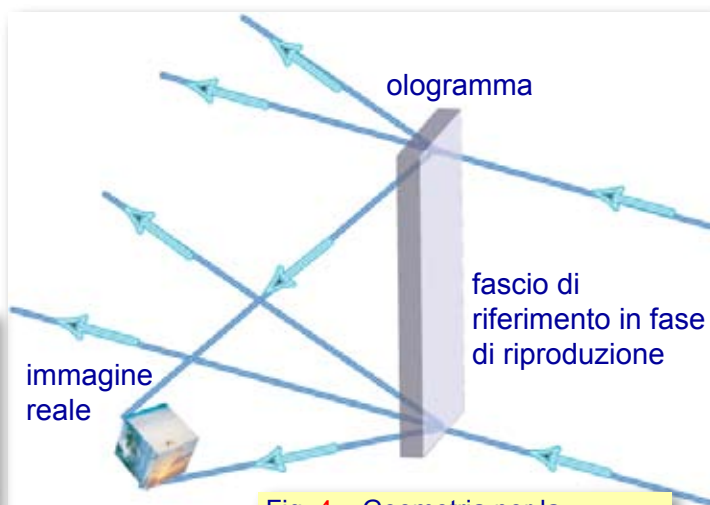



Fig. 4 – Geometria per la generazione dell'immagine reale.

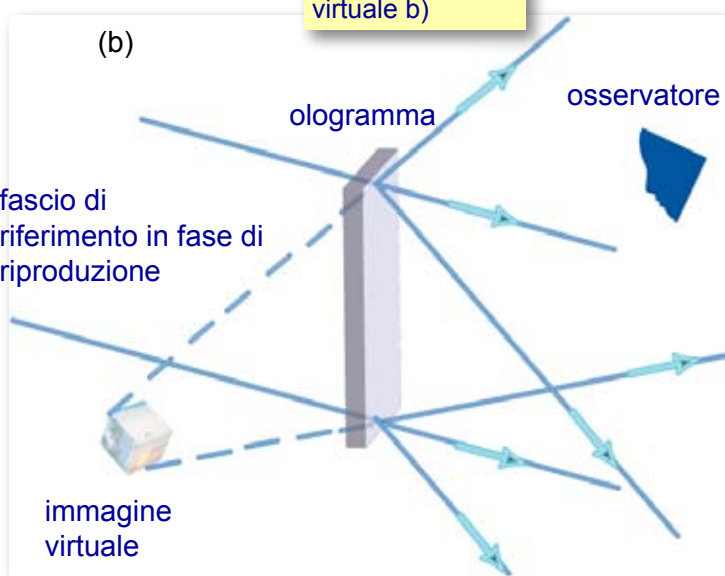



Fig. 5 – Modalità di visione di un ologramma a riflessione (a sinistra) ed esempio di immagine virtuale (in alto).

mento; nel seguito si illustrano i motivi per cui tale denominazione risulta corretta da un punto di vista matematico.

A seconda della posizione del fascio di riferimento rispetto all'ologramma si può generare un'immagine reale oppure si può osservare un'immagine virtuale. Nel secondo caso la luce, non necessariamente coerente, illumina l'ologramma e l'immagine tridimensionale appare nello spazio virtuale retrostante la lastra olografica come illustrato in figura 3. Il primo caso, invece, è molto più spettacolare: la luce coerente attraversa l'ologramma e genera la riproduzione tridimensionale della superficie illuminata dell'oggetto (figura 4) che può, se si usa un adatto visualizzatore volumetrico, essere osservata da più angolazioni.

A seconda della posizione dell'osservatore e della modalità di generazione dell'ologramma, si ha un *ologramma a trasmissione*, quando l'immagine viene osservata dal lato opposto a quello di provenienza del fascio di riferimento (vedi figura 3), oppure un *ologramma a riflessione*, quando l'immagine viene invece osservata dallo stesso lato del fascio di riferimento come illustrato in figura 5.

2.3 Un po' di teoria

In questo paragrafo si illustrano le basi teoriche dell'olografia, semplificando quanto riportato in [2, 3, 4, 5].

Si considerano dei fenomeni ondulatori quali, ad esempio, onde elettromagnetiche monocromatiche propagantesi nello spazio in linea retta. Tali fenomeni sono modellati tramite funzioni complesse definite nello spazio tridimensionale, rappresentanti le distribuzioni spaziali scalari dell'ampiezza e della fase di un'onda monocromatica:

$$U(x,y,z) = A(x,y,z)\, e^{j\Phi(x,y,z)} \qquad (1)$$

dove $A(x,y,z)$ descrive la distribuzione spaziale dell'ampiezza e $\Phi(x,y,z)$ la distribuzione spaziale della fase.

Con queste posizioni, la direzione di propagazione viene definita a parte, e d'altro canto è fissata dalla geometria considerata. Anche il verso di propagazione viene definito a parte; si rammenta che cambiando segno all'esponente, e perciò considerando il coniugato della grandezza in oggetto, si assume il verso di propagazione contrario a quello della grandezza originaria.

Si consideri un sistema di assi cartesiani e si supponga di far convergere due fasci di onde monocromatiche di lunghezza d'onda λ in una regione dello spazio attorno all'origine degli assi. In questa regione, a causa della sovrapposizione dei due fenomeni ondulatori, si generano fenomeni di interferenza, che producono distribuzioni spaziali dell'ampiezza e della fase con un andamento particolare che può essere visualizzato con un rivelatore adatto, per esempio, nel caso dell'olografia ottica, una lastra fotografica.

Si ipotizzi che tale rivelatore sia posto nel piano $z=0$; inoltre, per semplicità, si supponga che lo spessore di tale rivelatore sia nullo. In questo caso, quello che si deve considerare è la distribuzione dell'ampiezza e della fase nel piano x-y, e conseguentemente riveste importanza l'andamento della forma d'onda nello stesso piano descritta da una funzione del tipo:

$$U(x,y) = A(x,y)\, e^{j\Phi(x,y)} \qquad (2)$$

Il primo dei due fasci interferenti, denominato *fascio oggetto*, si suppone ottenuto per riflessione, diffusione, rifrazione o trasmissione su o attraverso un oggetto opportunamente illuminato. L'ampiezza complessa di tale fascio è indicata con $U_o(x,y)$.

Il secondo è denominato *fascio di riferimento* e la sua ampiezza complessa è indicata con $U_r(x,y)$.

La quantità fisicamente misurabile dal rivelatore è l'intensità dell'onda incidente prodotta dall'interferenza tra i due fasci, che si può indicare con:

$$I(x,y) = | U_r(x,y) + U_o(x,y) |^2 = |U_r(x,y)|^2 + |U_o(x,y)|^2 + U_r^*(x,y)\, U_o(x,y) + U_r(x,y)\, U_o^*(x,y) \qquad (3)$$

Si noti che al terzo termine compare U_o, quindi – in linea di principio – è possibile estrarlo dal prodotto dell'interferenza tramite opportune elaborazioni. Per realizzare ciò, nella pratica necessita un modulatore che modifichi le caratteristiche di un'onda incidente secondo un opportuno andamento spaziale.

E' molto difficile operare contemporaneamente sull'ampiezza e sulla fase. E' però possibile in modo relativamente semplice modulare l'ampiezza dell'onda incidente modificando la trasmittanza $t_A(x,y)$ del modulatore rendendola direttamente proporzionale all'intensità del prodotto dell'interferenza:

(4) $$t_A(x,y) = t_b + \beta\Delta I(x,y)$$

dove t_b e β sono costanti e ΔI indica la variazione dell'intensità luminosa attorno al suo valor medio.

Una proporzionalità simile può essere ottenuta in un materiale puramente sfasatore:

(5) $$tA(x,y) = e^{j\mu\Delta I(x,y)} = 1 + j\mu\Delta I(x,y)$$

dove μ è una costante e la relazione vale per piccole profondità di modulazione, ossia valori piccoli per ΔI.

In pratica non è possibile ottenere un'attenuazione o uno sfasamento puri, ma le relazioni suesposte rimangono dei validi modelli per capire il principio.

Si supponga ora di illuminare il modulatore con un fascio luminoso uguale al fascio di riferimento U_r. Trascurando termini costanti, si ottiene il risultato della modulazione:

(6) $$U_c(x,y) = U_r(x,y)\, I(x,y) = U_r\, |Ur|^2 + U_r\, |U_o|^2 + U_r U_r^* U_o + U_r U_r U_o^* = U_r\, |U_r|^2 + U_r\, |U_o|^2 + |U_r|^2\, U_o + U_r^2\, U_o^*$$

Si noti che al terzo termine compare ancora la forma d'onda dell'oggetto U_o, che può essere ricostruita se si riesce a separarla dagli altri termini.

La cosa in pratica non è facile da farsi e si è rivelata il maggiore ostacolo all'utilizzazione dell'olografia fino a quando Leith e Upatnieks introdussero la tecnica del *riferimento offset* [6][Nota 5].

Questa tecnica prevede di utilizzare come fascio di riferimento un'onda piana incidente il cui vettore d'onda nel piano y-z sia inclinato di un angolo Φ rispetto all'asse z:

(7) $$U_r(x,y) = A\, e^{-j2\pi\alpha y}$$

Dove A è una costante e $\alpha = \sin \Phi/\lambda$. Esprimendo il fascio oggetto in termini di ampiezza e fase nel modo seguente:

(8) $$U_o(x,y) = a(x,y)\, e^{j\Theta(x,y)}$$

e introducendo la (7) e la (8) nella (3), si ottiene la seguente forma per il risultato dell'interferenza:

(9) $$I(x,y) = A^2 + a^2(x,y) + Aa(x,y)\, e^{j[2\pi\alpha y+\Theta(x,y)]} + Aa(x,y)\, e^{-j[2\pi\alpha y+\Theta(x,y)]} = A^2 + a^2(x,y) + 2Aa(x,y) \cos[2\pi\alpha y+\Theta(x,y)]$$

Secondo questa formulazione, l'ampiezza e la fase del fascio oggetto risultano codificate come modulazione di ampiezza e di fase di una portante spaziale di frequenza α.

Memorizzando questo andamento spaziale in termini di trasmittanza del supporto di registrazione, per esempio una lastra fotografica, si ottiene un ologramma che diventa un modulatore di luce quando viene opportunamente illuminato.

Illuminando l'ologramma con un fascio luminoso uguale al fascio di riferimento come in (7) ed

Nota 5 - Il metodo di Gabor prevede che la sorgente di onde coerenti sia in asse con la lastra olografica e l'oggetto. Questa configurazione fu obbligata dalla bassa coerenza della sorgente luminosa disponibile [5], e si presta solamente a riprendere gli oggetti in trasparenza. In fase di riproduzione sia l'immagine virtuale sia quella reale risultano in asse con la sorgente luminosa e perciò la visione delle immagini riprodotte non è agevole a causa della loro sovrapposizione.

esprimendo U_o come in (8), dalla (6) si ottiene:

$$(10) \quad U_c(x,y) = A^3 e^{-j2\pi\alpha} + A a^2(x,y) e^{-j2\pi\alpha y} + A^2 a(x,y) e^{j\Theta(x,y)} + A^2 a(x,y) e^{-j[4\pi\alpha y+\Theta(x,y)]}$$

A parte fattori moltiplicativi, il terzo termine è una duplicazione del fronte d'onda oggetto. I primi due termini sono onde che si propagano nella stessa direzione del fascio di riferimento, mentre il quarto termine indica un'onda che si propaga con un angolo più piccolo rispetto ai primi due termini.

In altre parole, l'illuminazione angolata fa sì che le forme d'onda spurie (1°, 2° e 4° termine della (10)) non si propaghino verso l'osservatore, il quale perciò, se si pone nella posizione corretta, può intercettare la ricostruzione della forma d'onda oggetto (3° termine della (10)) e vedere l'immagine virtuale dell'oggetto al di là dell'ologramma.

Illuminando l'ologramma con un fascio uguale al complesso coniugato U_r^* del fascio di riferimento, cioè con un'onda che si propaga nella stessa direzione ma con verso opposto, si ottiene che il quarto termine della (10) risulta proporzionale a U_o^*, che corrisponde ad un'onda uguale al fascio oggetto ma che si propaga in senso opposto, convergendo a formare un'immagine reale dell'oggetto ripreso. Gli altri termini spuri anche in questo caso si propagano in direzioni non disturbanti.

2.4 Tipologie di ologramma e loro caratteristiche

Ulteriori approfondimenti esulano dallo scopo di questo articolo, tuttavia alcune caratteristiche degli ologrammi paiono interessanti e meritano di essere citate.

Ingrandimento

Operando con oggetti non puntiformi, in fase di riproduzione si possono ottenere immagini ingrandite o rimpicciolite rispetto alle dimensioni dell'oggetto ripreso; questa caratteristica viene utilizzata nel campo della microscopia.

Il rapporto di scala trasversale M_t e longitudinale M_l sono legati dalla seguente relazione:

$$(11) \quad M_l = \lambda_1/\lambda_2 \, M_t^2$$

dove λ_1 e λ_2 sono le lunghezze d'onda utilizzate rispettivamente in registrazione e in riproduzione.

Nel caso in cui λ_1 e λ_2 siano diverse, M_t assume valori diversi da 1 e M_l risulta diverso da M_t, ossia si verifica una distorsione dell'immagine riprodotta.

Una parziale compensazione si ottiene scalando le dimensioni dell'ologramma di un fattore appropriato. Sennonché, qualora le lunghezze d'onda utilizzate siano molto diverse, per esempio microonde in fase di registrazione ($\lambda_1 \approx 10^{-2}$) e onde luminose in fase di riproduzione ($\lambda_2 \approx 0.5\ 10^{-6}$) [7], il fattore di scalamento dell'ologramma diventa così elevato (nell'esempio fatto risulta pari a 2 10^4), che risulta impossibile da gestire nella pratica poiché si richiederebbero registratori olografici di grandi e non pratiche dimensioni e ologrammi talmente piccoli da essere quasi invisibili.

Ologrammi spessi: ologrammi multipli, colorati, in luce bianca e a riflessione

Se il più piccolo periodo spaziale della frangia di interferenza registrata sull'ologramma è maggiore dello spessore del supporto, quest'ultimo può essere considerato bidimensionale, altrimenti la frangia si comporta come una struttura diffrangente tridimensionale.

All'interno di un supporto "spesso" nell'accezione suindicata, in fase di registrazione si formano, e vengono memorizzate, delle onde stazionarie spaziali (vedi figura 6) caratterizzate da un andamento dipendente dal valore dell'angolo compreso tra il fascio oggetto e quello di riferimento, nonché dalla lunghezza d'onda utilizzata.

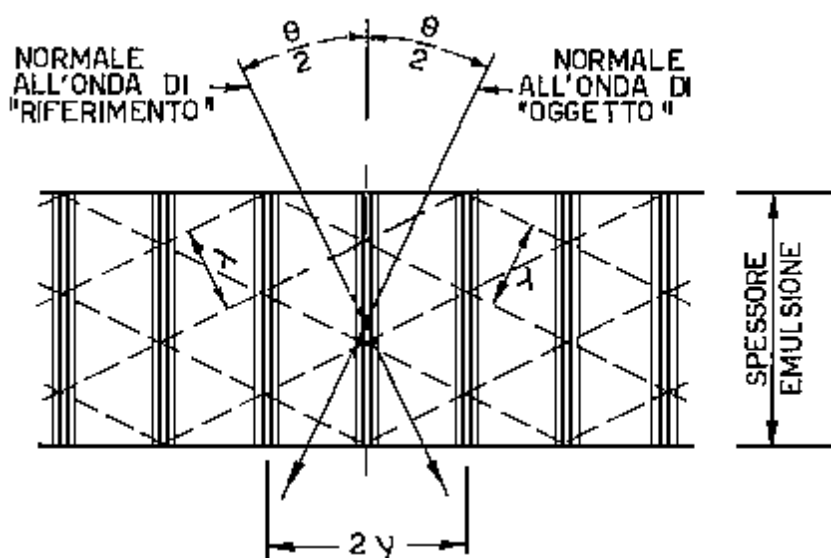



Fig. 6 – Illustrazione schematica delle frange di interferenza che si generano all'interno del supporto.

E' perciò possibile registrare nello stesso volume del supporto diversi ologrammi, ciascuno relativo ad un dato valore dell'angolo tra i fasci oppure ciascuno relativo ad una data lunghezza d'onda. Ovviamente si possono combinare le due tecniche.

Ologrammi multipli

Regolando l'inclinazione del fascio di riferimento in fase di riproduzione, si riesce a riprodurre l'immagine registrata con la stessa inclinazione del fascio di riferimento usata in fase di memorizzazione.

In questo modo è possibile registrare più ologrammi nello stesso volume di materiale utilizzando una sola sorgente coerente.

Lo sfruttamento di tale caratteristica nel campo della memorizzazione di dati permette di aumentare la densità di registrazione e, in definitiva, la capacità dei supporti di memorizzazione.

Ologrammi colorati

Utilizzando lunghezze d'onda diverse, pur con la stessa geometria di ripresa, si ottengono frange di interferenza con andamenti differenti.

In fase di riproduzione, utilizzando un fascio di riferimento con una data lunghezza d'onda, si ottiene la ricostruzione dell'immagine registrata con la stessa lunghezza d'onda.

Quindi, per esempio, se si registrano nello stesso supporto gli ologrammi dello stesso oggetto ottenuti con fasci luminosi caratterizzati dalle lunghezze d'onda di tre primari colorimetrici, e utilizzando in riproduzione contemporaneamente tre fasci di riferimento con le stesse lunghezze d'onda usate in registrazione, si possono ottenere riproduzioni a colori degli oggetti ripresi [8].

Ologrammi in luce bianca

Le frange di interferenza agiscono come filtri poiché si comportano come reticoli di diffrazione.

Se in fase di riproduzione si illumina l'ologramma con luce bianca, che come è noto contiene tutte le lunghezze d'onda visibili, solo le componenti con le lunghezze d'onda utilizzate in registrazione saranno in grado di riprodurre immagini, mentre le altre non daranno contributi.

Pertanto, registrando ologrammi colorati, come sopra descritto, su supporto spesso, in fase di riproduzione è sufficiente utilizzare una sorgente di luce bianca per ottenere riproduzioni a colori.

Ologrammi a riflessione

Un tipo di ologrammi a riflessione si può ottenere con supporti di registrazione "spessi", facendo interferire il fascio di riferimento con un fascio oggetto proveniente dalla parte opposta dell'ologramma, come illustrato in figura 7.

In fase di riproduzione si illumina l'ologramma con un fascio uguale a quello di riferimento come illustrato in figura 8, ottenendo un'immagine virtuale o un'immagine reale, ma sempre per riflessione.

3. Alcune applicazioni dell'olografia

Al giorno d'oggi le applicazioni dell'olografia sono numerose. Spesso si tratta di applicazioni industriali magari diffusissime, ma non particolarmente vistose né, in particolare, finalizzate allo spettacolo.

Gli ologrammi di piccole dimensioni sono piuttosto diffusi e vengono utilizzati come etichette o sigilli di garanzia. In questo caso si sfrutta la difficoltà di riproduzione di un ologramma e infatti tra i maggiori utilizzatori si trovano le zecche [Nota 6] (p.es. per la carta moneta), gli istituti di credito (p.es. per le carte di credito) e le industrie che vogliono salvaguardare l'origine del prodotto in vendita (p.es. per i supporti per software).

Gli ologrammi di maggiori dimensioni[Nota 7], e soprattutto per immagini in movimento, sono invece ancora di scarsissima diffusione, sebbene esistano prodotti, attualmente in fase di sviluppo avanzato, che potrebbero essere immessi sul mercato di massa entro pochi anni.

Una di queste applicazioni è la televisione tridimensionale. Vi sono molti studi e esperimenti in proposito, ma vi sono ancora diversi problemi, alcuni di ardua soluzione.

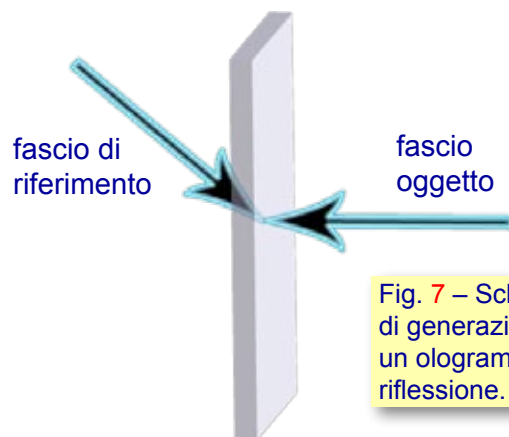



Fig. 7 – Schema di generazione di un ologramma a riflessione.

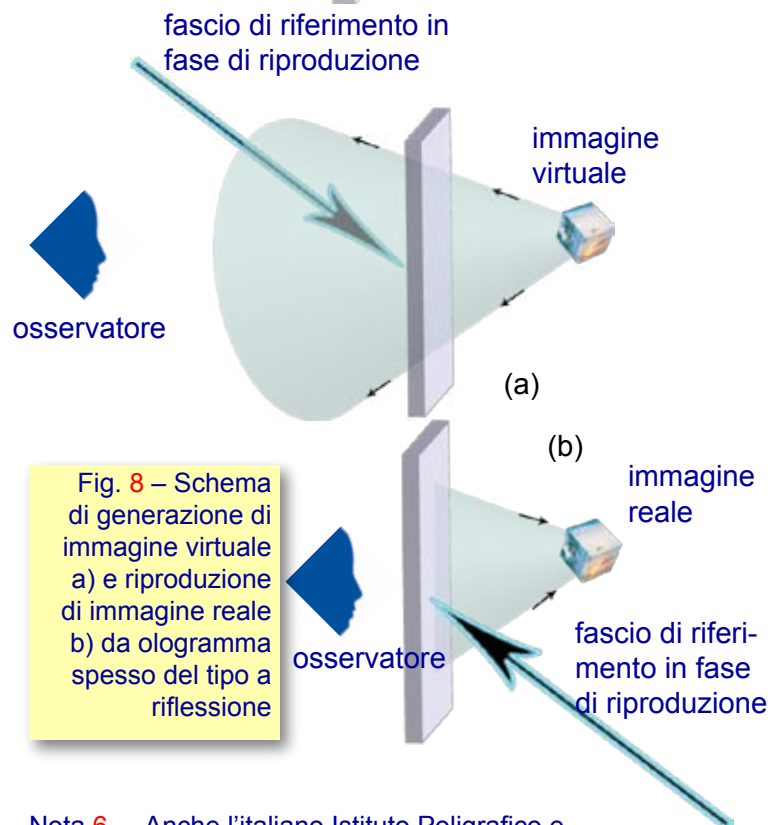



Fig. 8 – Schema di generazione di immagine virtuale a) e riproduzione di immagine reale b) da ologramma spesso del tipo a riflessione

Nota 6 - Anche l'italiano Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato è dotato della tecnologia per la realizzazione di ologrammi, che utilizza per la stampa di carta moneta e di francobolli (vedi riquadro nelle pagine seguenti).

Nota 7 - Per esempio, la texana Zebra Imaging (http://www.zebraimaging.com) realizza immagini olografiche di grandi dimensioni (p.es. cm 60 x 60) presentandole come strumenti avanzati di progetto e visualizzazione nel campo dell'ingegneria, del design e scientifico, nonché come ausilio alle attività di marketing e commerciali. La visualizzazione olografica viene proposta anche per applicazioni nel campo militare, di gestione del territorio e di difesa del suolo.

I PRODOTTI DI SICUREZZA DELL'ISTITUTO POLIGRAFICO E ZECCA DELLO STATO

Trattando le "etichette olografiche", non è possibile trascurare la produzione dell'Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato (IPZS), se non altro perché l'Istituto è da sempre particolarmente coinvolto ad altissimo livello nelle tecnologie anticontraffazione, essendo incaricato della stampa della carta moneta ufficiale. In questo riquadro si riportano alcune informazioni ricavate dal sito dell'Istituto, relative ai prodotti di sicurezza da esso commercializzati. L'autorevolezza della sorgente (www.ipzs.it) ci è parsa la migliore garanzia riguardo alla descrizione dei vari sistemi utilizzabili, e nella fattispecie adottati dall'Istituto.

In particolare, dalla loro documentazione risulta chiaro che i sigilli di sicurezza non necessariamente contengono ologrammi: sia nel caso in cui i sigilli di sicurezza siano i prodotti venduti, sia nel caso in cui i sigilli di sicurezza siano utilizzati in quanto tali, e cioè come strumenti anticontraffazione.

L'IPZS tra i suoi prodotti di sicurezza realizza una vasta gamma di "ologrammi" anticontraffazione, applicando le più avanzate tecnologie di acquisizione, trattamento digitale dell'immagine e complessi sistemi di codifica; anche nella realizzazione di un ologramma, accanto ad un'alta tecnologia, convivono l'esperienza grafica e la perizia manuale proprie della tradizione dell'Istituto.

L'ologramma - o più propriamente il DOVID (*Diffractive Optically Variable Image Device*) - è un vero e proprio dispositivo ottico ottenuto con l'integrazione di diverse tecniche. Se illuminato propriamente, può generare immagini tridimensionali che rendono le diverse prospettive del soggetto a seconda dell'angolo di osservazione (grazie all'eventuale ologramma vero e proprio), effetti cinetici con elementi grafici in movimento, animazioni e trasformazioni dell'immagine, informazioni invisibili in luce bianca. Una ulteriore peculiarità dell'ologramma riguarda gli elementi grafici che assumono le diverse tonalità dell'iride al variare dell'angolo d'illuminazione. E' facilmente identificabile e non può essere riprodotto con sistemi di copiatura convenzionali quali, ad esempio, le fotocopiatrici a colori o gli scanner, anche se ad alta definizione. È possibile inoltre aumentare la complessità di un ologramma inserendo ulteriori immagini o informazioni visualizzabili solo con un dispositivo di lettura e decodifica appropriato. Per le sue peculiari caratteristiche, un DOVID è sicuramente tra i dispositivi più robusti contro i tentativi di riproduzione e quindi particolarmente indicato per ridurre i rischi di contraffazione di documenti, carte plastiche, banconote, marchi e attestati di genuinità in genere.

Un DOVID può essere inserito su carte valori (passaporti, carte d'identità, ecc.) utilizzando due processi tecnologici:

- tecnologia tamper-evident (l'ologramma si distrugge nel tentativo di rimozione)
- tecnologia HSF (applicazione a caldo di una pellicola trasparente o metallizzata a più strati, detta lamina).

In particolare, una pellicola trasparente olografica è prevista per la protezione dei dati personali nella produzione di documenti di identità, passaporti e tessere di riconoscimento, mentre i DOVID prodotti su laminato metallizzato sono applicati a caldo su carte d'identità elettroniche, titoli di stato, banconote, tessere di riconoscimento, ecc.

Tecniche

Ologrammi 2D e 3D

Gli ologrammi 2D - 3D hanno la peculiarità dell'effetto tridimensionale, che non è un'illusione ottica, bensì l'immagazzinamento dell'informazione della profondità. In questo tipo di ologramma quest'effetto è ottenuto con la collocazione spaziale differenziata d'oggetti bidimensionali, riprodotti a profondità diverse. La tecnologia 2D - 3D offre inoltre la possibilità di originare effetti multicanali e cinematismi, e di registrare una sequenza di immagini che viene riprodotta ruotando l'ologramma lungo l'asse verticale. La difficoltà di riproduzione di questo tipo d'ologramma consiste, oltre che nel generare un disegno identico all'originale, anche nel riprodurre la stessa combinazione di colori, profondità ed effetti cinetici.

Ologrammi 3D

Nell'ologramma di tipo 3D, la tridimensionalità è data dall'inserimento di un modello fisico in tre dimensioni, che esce dal piano olografico. L'immagine olografica è un'informazione completa del fronte d'onda emesso da un oggetto illuminato. La percezione visiva di un oggetto ripreso nell'ologramma è dunque la stessa che si ha osservandolo nella realtà, con la possibilità di ruotarlo per cambiare la proiezione delle ombre o la visione prospettica. La riproduzione di un ologramma 3D presuppone la realizzazione di un modello identico all'originale, la stessa geometria d'illuminazione ed uguale combinazione cromatica.

Dot-matrix

La tecnica dot-matrix consiste nella realizzazione di una matrice di reticoli diffrattivi, delle dimensioni dell'ordine di decine di micron, registrati in successione con fasci laser focalizzati. Il controllo automatizzato delle orientazioni dei reticoli permette di ottenere svariati effetti cinetici come espansioni e contrazioni, rotazioni, sfumature.

Materiali

I materiali da stampa e i tipi di applicazione offrono una garanzia di anticontraffazione dedicata alla tipologia del prodotto da proteggere. Gli ologrammi stampati su laminati polimerici con spessori dai 20 ai 50 micron e collanti adesivi a freddo (PS) vengono utilizzati come etichette autoadesive per l'identificazione dei prodotti commerciali (alimentari, abbigliamento, ricambi di parti meccaniche, prodotti video, software, ecc.). E' possibile applicare l'ologramma PS su etichette tessute utilizzando un procedimento specifico. L'ologramma può essere stampato su un materiale PS tamper evident, in modo tale da ottenere etichette autoadesive che si frantumano al minimo tentativo di rimozione, evidenziando la manomissione del prodotto sul quale sono applicate. Si utilizza un materiale Hot Stamping Foil (HSF) nel caso di applicazioni a caldo su supporti plastici e cartacei, dove l'ologramma viene strettamente ancorato al supporto senza produrre alcun rilievo sulla sua superficie. Infatti i laminati utilizzati per questo tipo di applicazione hanno uno spessore pari a circa 2 micron. Gli ologrammi applicati a caldo trovano impiego nella protezione dei dati personali su carte plastiche e documenti, e come elemento di anticontraffazione su carte valori e banconote.

Fig. 9 – Francobollo da 0,80 € emesso, il 21 settembre 2005, dalle Poste Italiane in occasione del contributo italiano all'esplorazione di Marte. La vignetta raffigura un radar in orbita intorno ad un pianeta e, in basso a sinistra, è riprodotto il logo dell'Agenzia Spaziale Italiana che coordina la partecipazione italiana. Al centro è applicato un ologramma che rappresenta la propagazione delle onde elettromagnetiche emesse dal radar, sul quale è riportato più volte l'acronimo "ASI". Completano il francobollo la leggenda "ESPLORAZIONE DI MARTE", la scritta "ITALIA" ed il valore "€ 0,80". Il francobollo è stampato presso l'Officina Carte Valori dell'Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato S.p.A., in rotocalcografia, con ologramma (DOVID), applicato a caldo.

3.1 Applicazioni industriali

L'olografia è utilizzata da tempo in applicazioni poco note al grande pubblico, nel campo industriale e metrologico. Nel seguito si riportano alcuni esempi.

Microscopia olografica

Le tecniche olografiche possono essere utilizzate nel campo della microscopia dove la limitatezza della profondità di campo diventa un limite, poiché permettono di studiare l'intero campione senza la necessità di sezionarlo in piani, con il rischio di modificarne la struttura.

In questa applicazione si registra un ologramma dell'oggetto considerato, che contiene le informazioni relative a tutto l'oggetto nelle tre dimensioni, e successivamente si riproduce un'immagine reale analizzandola sezione per sezione.

Per inciso, le prime applicazioni dell'olografia sviluppate da Gabor erano proprio tecniche applicate alla microscopia di oggetti trasparenti.

Interferometria olografica

La tecnica dell'interferometria olografica è un valido strumento di analisi e misura scoperto indipendentemente da vari studiosi nel 1965. La versione più semplice è la tecnica della doppia esposizione.

Si supponga di memorizzare un ologramma di un oggetto sotto analisi. Com'è noto, ciò che viene registrato è l'andamento dell'ampiezza del prodotto dell'interferenza tra fascio oggetto e fascio di riferimento, modellato dalla relazione (3) che qui si riporta per comodità:

$$I(x,y) = | U_r(x,y) + U_o(x,y) |^2 \quad (3)$$

Registrando sullo stesso supporto, con la stessa geometria e con lo stesso raggio di riferimento, un secondo ologramma ricavato dallo stesso oggetto ripreso in un istante di tempo differente, si ottiene la sovrapposizione delle ampiezze dei due prodotti interferenziali:

$$I(x,y) = | U_r(x,y) + U_{o1}(x,y) |^2 \tau_1 + | U_r(x,y) + U_{o2}(x,y) |^2 \tau_2 \quad (12)$$

dove τ_1 e τ_2 sono dei fattori di pesatura che tengono conto della durata dell'esposizione delle due registrazioni.

In fase di riproduzione si utilizza, come di consueto, una copia del fascio di riferimento U_r e si ricostruisce una forma d'onda contenente un termine composto dalla sovrapposizione pesata dei due fasci oggetto, che interferiscono tra loro:

$$U_c' = |U_r|^2 (U_{o1} \tau_1 + U_{o2} \tau_2) \quad (13)$$

Questa tecnica è un metodo di *interferometria differenziale*: se l'oggetto rimane invariato nelle due registrazioni, non si ottengono frange di interferenza. Invece, se l'oggetto subisce variazioni dimensionali, per esempio perché ne varia la temperatura oppure è messo sotto sforzo meccanico, si ottengono frange di interferenza analizzando le quali si possono ricavare informazioni sulle deformazioni avvenute. Il pregio della tecnica è che vengono rivelate differenze dimensionali dell'ordine di mezza lunghezza d'onda della luce utilizzata, quindi con una precisione elevatissima.

Registrando esposizioni multiple e, a limite, con continuità in un dato intervallo di tempo, si ottiene un metodo che si è rivelato utile per analizzare fenomeni vibratori.

3.2 Etichette e sigilli di garanzia

Essendo estremamente difficili da contraffare, gli ologrammi sono ampiamente utilizzati come sistema antifalsificazione nei sigilli di garanzia e nella produzione di banconote, documenti, marche da bollo, francobolli (figura 8), carte di credito e così via.

Nel campo commerciale l'interesse per le etichette olografiche è dovuto al fatto che ad un costo poco superiore a quello di un'etichetta tradizio-

nale si possono ottenere consistenti recuperi di vendita e realizzare campagne promozionali.

Nei casi più semplici si sfrutta l'apparenza inusuale ed un po' eterea delle eventuali immagini registrate, nonché la policromia iridescente, per migliorare l'estetica dell'etichetta e la sua capacità di richiamo del consumatore.

Nei casi più complessi si sfrutta invece la difficoltà di riproduzione dell'ologramma per combattere la contraffazione di marchi, loghi, prodotti, buoni sconto, raccolte punti, eccetera.

Insieme alle eventuali immagini o loghi aziendali o di prodotto, infatti, nei casi più delicati, per aumentare la sicurezza, si inseriscono nell'ologramma informazioni nascoste invisibili ad occhio nudo, ma rilevabili con appositi strumenti, oppure si memorizzano codici, eventualmente crittografati.

Con questo tipo di sigilli l'utente può sincerarsi sull'origine del prodotto da una semplice analisi visiva dell'etichetta. Si noti che, in questo caso, l'adozione dell'ologramma si accompagna generalmente con una apposita campagna pubblicitaria per informare i consumatori della presenza e delle caratteristiche dell'ologramma sui prodotti oggetto di protezione[Nota 8].

Non tutte le etichette iridescenti sono ologrammi, però: nel prossimo capitolo si descrivono brevemente alcuni prodotti chiamati "olografici" ma che per la verità non sono basati sull'olografia.

3.3 Memorizzazione olografica di dati

In alcune attività che fanno uso di elaboratori elettronici vi è la necessità di memorizzare elevatissime quantità di dati[Nota 9], come esempi si consideri l'archiviazione di materiale televisivo ad alta definizione, l'archiviazione di data base aziendali di grandi dimensioni, gli archivi di immagini – in particolare mediche -, gli archivi di documenti – per esempio nella pubblica amministrazione -, e così via.

I supporti magnetici, in particolare i nastri, hanno seri problemi di affidabilità nel tempo - vengono ancora intensivamente usati in forza della loro economicità e perché la tecnologia è consolidata – ma i supporti ottici sono particolarmente invitanti per diversi motivi: semplicità meccanica del supporto, dimensioni ridotte, costo in prospettiva relativamente basso, durata nel tempo. Tuttavia, i vari formati che si sono succeduti sul mercato: CD e DVD e più recentemente: Blu-ray Disk e HD-DVD, non si sono finora dimostrati economicamente validi per essere adottati in archivi di dimensioni considerevoli poiché di capacità limitata rispetto alle necessità dei grandi archivi.

Nei prossimi mesi dovrebbe essere introdotto sul mercato di un nuovo supporto ottico che, grazie alla tecnica olografica adottata, ha caratteristiche superiori a quelli attuali. In particolare si evidenzia l'elevata velocità di trasferimento di dati , la capacità molto superiore ai supporti tradizionali, ancorché di nuova generazione, e la durata nel tempo, stimata in 50 anni.

Per il nuovo supporto, infatti, non si adotta la tecnica usata negli altri supporti ottici, dove un laser illumina una superficie riflettente su cui sono registrati i singoli bit (tramite i "pits"), che vengono scanditi sequenzialmente per ricavarne il valore analizzando le caratteristiche di riflessione, bensì si genera un ologramma.

Nota 8 - Esempio di quanto detto sono le campagne di AMD per suoi i processori "boxed" e di Nokia relativa agli accumulatori per cellulari di propria produzione.
Nota 9 - Gli annunci commerciali riportano capacità di 300 GB con transfer rate di 20 MB/s per la prima generazione disponibile verso la fine del 2006, capacità di 800 GB per la seconda generazione annunciata per il 2008, e capacità di 1.6 TB per il 2010. Altra documentazione riporta capacità pari a 2 GB su un supporto delle dimensioni di un francobollo, 20 GB su supporto delle dimensioni di una carta di credito e 200 GB su un disco circa delle dimensioni di un CD.

Fig. 10 – Schema del processo di scrittura su supporto olografico (fonte: computer.howstuffworks.com/holographic-memory2.htm).

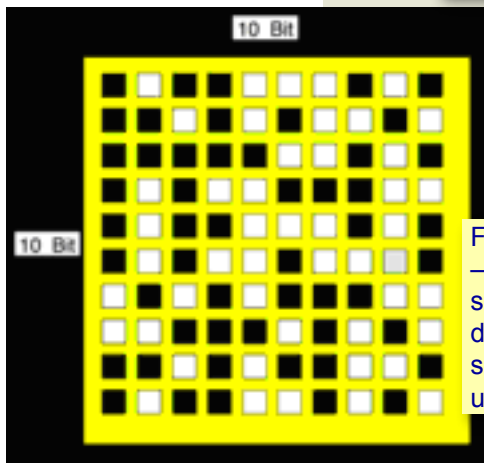



Fig. 11 – Illustrazione schematica della disposizione spaziale dei pixel in un SLM.

Fase di scrittura/memorizzazione

La luce di un laser viene suddivisa in due fasci, quello di segnale e quello di riferimento. Il primo fascio attraversa un modulatore spaziale di luce (SLM, Spatial Light Modulator) che traduce i dati binari in ingresso in una figura “a scacchiera” di pixel chiari e scuri, e funge da *fascio oggetto*.

Nel punto di intersezione del raggio di segnale con quello di riferimento si genera un ologramma che viene memorizzato nel supporto di memorizzazione sensibile alla luce. Qui infatti, la luce attiva una reazione chimica (per esempio la fotopolimerasi in adatti supporti polimerici) che modifica permanentemente le caratteristiche ottiche del materiale (per esempio un cristallo di Niobato di Litio[Nota 10]) costituente il supporto, ottenendo la memorizzazione dell’ologramma.

I dati sono formattati in una pagina di circa un milione di bit che vengono memorizzati in parallelo con un solo impulso luminoso, ottenendo perciò un’elevata velocità di scrittura (transfer rate).

Modificando l’angolo di incidenza del raggio di riferimento, o la lunghezza d’onda del laser, o la posizione del supporto si possono memorizzare molti ologrammi differenti nello stesso volume di materiale, ottenendo un’elevatissima capacità di memorizzazione per unità di superficie del supporto[Nota 11].

Nota 10 - La massima capacità di registrazione di un ologramma si può ottenere sfruttando le caratteristiche di purezza e di ordine reticolare dei cristalli. La sostanza cristallina più adatta sinora trovata è il Niobato di Litio (LiNbO3), un solido cristallino non presente in natura, sintetizzato per reazione chimica da carbonato di litio e pentossido di niobio. E’ uno dei materiali più ampiamente usati nelle tecnologie fotoniche, grazie soprattutto ad una combinazione unica di proprietà, quali un ampio intervallo spettrale in cui è trasparente, la possibilità di realizzare guide d’onda a bassa perdita, una elevata non-linearità al secondo ordine, sfruttabile per generare effetti elettro-ottici e nonlineari, fotorifrattività, effetto piezoelettrico ed effetto piroelettrico. Il niobato di litio è oggetto di una vasta ricerca, che è diventata di avanguardia per applicazioni in diversi campi, come ad esempio telecomunicazioni ottiche, sensori ottici e memorie ottiche. Riguardo a quest’ultima, la densità teorica di informazione registrabile nel niobato di litio è superiore ai 10 GB/mm^3.

Nota 11 - La tecnologia sviluppata dalla InPhase ha una capacità superficiale di 31.5 $Gbit/in^2$ (pari a circa 0.6 GB/mm^2).

Fig. 12 – Schema del processo di lettura da supporto olografico. (fonte: computer.howstuffworks.com/holographic-memory2.htm).

Fase di lettura

In fase di lettura, il supporto ottico viene illuminato da un raggio laser avente la stessa lunghezza d'onda e inclinazione di quello utilizzato in scrittura, riproducendo, in un piano, l'immagine reale della disposizione spaziale "a scacchiera" dei dati, che un rivelatore di luce "legge" in parallelo.

Fig. 13 – Cartuccia con disco olografico presentata da Maxell e driver InPhase.

Il supporto

Ecma (www.ecma-international.org) ha istituito nel dicembre 2004 un comitato tecnico (TC44 - Holographic Information Storage Systems) con lo scopo di standardizzare i sistemi di memorizzazione basati su olografia. Sono stati proposti sistemi basati su disco, come quello presentati da Hitachi-Maxell e InPhase (figura 13) e dalla HVD Alliance (HDV, *Holographic Versatile Disk,*) (figura 14). Nel 2005 è stato presentato anche un supporto basato su card, illustrato in figura 15.

Fig. 14 – HVD nel formato proposto da HVD Alliance.

I particolari tecnici possono differire tra un sistema e l'altro[Nota 12], ma la tecnologia olografica sottesa rimane sostanzialmente identica.

Nota 12 - Si possono adottare in effetti almeno due tipi di tecnica olografica: quella a due assi, simile al procedimento "classico" e quella denominata collineare sviluppata dalla Optware. (www.hvd-alliance.org/abouthvd/technology.html)

Fig. 15 – Holographic Versatile Card presentata da Optware.

3.4 La televisione olografica

La televisione olografica viene spesso ritenuta la tecnologia "definitiva" nel campo della visione tridimensionale in quanto è capace di riprodurre immagini tridimensionali reali o, in alternativa, di visualizzare immagini tridimensionali virtuali, senza dover ingannare l'occhio come si fa nella stereoscopia.

La visione dovrebbe risultare più naturale, non affaticante, e tridimensionale di per sé, con la possibilità di osservare anche parti nascoste degli oggetti semplicemente cambiando il punto di osservazione.

Tuttavia, se gli scopi sono ben definiti, non altrettanto sembra essere la tecnologia utilizzabile: in bibliografia non si reperiscono infatti che informazioni relative ad alcune tecniche ed apparati che, ancorché importanti, sono insufficienti a formare un'intera catena televisiva.

Fig. 18 – Illustrazione "artistica" di visualizzatore volumetrico "casalingo" che riproduce un'immagine tridimensionale reale.

Fig. 16 – Impianto sperimentale del gruppo di Garner. Il recipiente contenente il gel di agarose visibile sulla sinistra funge da visualizzatore delle immagini tridimensionali reali [10].

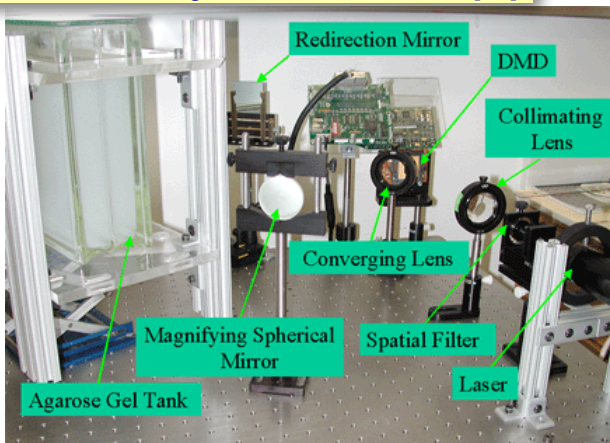



Fig. 17 – Display volumetrico del gruppo di Garner in funzione.

Nel seguito si riportano alcune delle informazioni reperite, commentando pregi, difetti e utilizzabilità degli apparati e tecniche illustrate ai fini di un servizio televisivo ed evidenziando le problematiche ancora irrisolte.

La visualizzazione

Questa breve descrizione delle tecniche applicabili alla televisione olografica parte dal fondo della catena, ossia dalle tecniche e apparati di visualizzazione, poiché esse al momento sembrano essere maggiormente definite.

Utilizzando dei proiettori a microspecchi (DMD Digital Mirror Devices) prodotti dalla Texas Instruments come modulatori di fase e di ampiezza, un gruppo di ricerca texano facente capo al dottor H.R. Garner ha sviluppato un proiettore olografico in grado di generare immagini tridimensionali reali e virtuali [9, 10, 11, 12]. I loro esperimenti si basano sulla generazione di ologrammi tramite elaboratore elettronico, che vengono passati al proiettore olografico basato su DMD per la riproduzione delle immagini.

Il valore tecnologico dell'esperimento risiede sia nella visualizzazione di immagini tridimensionali non statiche, e per inciso prodotte tramite elaboratori elettronici a partire da modelli tridimensionali, sia – di particolare importanza in questo articolo - nell'avere sviluppato un nuovo tipo di visualizzatore olograficoNota 13.

Dal punto di vista della generazione delle immagini in movimento, la chiave del procedimento è la generazione di un ologramma a partire da modelli 3D che, in quanto bidimensionale, richiede una capacità di calcolo relativamente ridotta, a differenza delle immagini basate su matrici tridimensionali di voxel (elementi volumetrici di immagine): infatti un ologramma equivale ad un'immagine tridimensionale volumetrica composta da una quantità di dati tra le 10 e le 100 volte tanto [12].

Dal punto di vista dell'apparato di visualizzazione, si evidenzia come questo sia un modulatore di luce di tipo nuovo, non solo alternativo alla tipica lastra fotografica, ma con caratteristiche tali da poterlo utilizzare con le frequenze di quadro tipiche del sistema televisivo, e quindi adatto per la riproduzione di immagini in movimento.

Invece, presso il Science and Technical Research Laboratory (STRL) della giapponese NHK (Nippon Hōsō Kyōkai, la società pubblica giapponese di diffusione radiotelevisiva), si è sviluppato un display olografico sperimentale basato su pannelli LCD, pensato per poter osservare l'immagine tridimensionale virtuale e capace di riprodurre ologrammi alla frequenza di quadro televisiva [13].

La risoluzione dei pannelli LCD è di circa un ordine di grandezza inferiore a quella delle lastre fotografiche normalmente utilizzate nel campo dell'olografia: il *pitch* tra pixel adiacenti è dell'ordine dei 10 μm mentre la risoluzione delle lastre è pari a circa 1000 linee/mm. Come conseguenza, il fascio di riferimento in riproduzione non può essere molto angolato rispetto al pannello, e perciò si verifica la sovrapposizione tra il fascio oggetto ricostruito, il fascio coniugato e il fascio di riferimento stesso, il che impedisce una chiara visualizzazione dell'immagine virtuale riprodotta.

La tecnica sviluppata da NHK per ovviare a questo inconveniente consiste nel focalizzare il fascio di riferimento in un punto dove si pone un piccolo schermo opaco che così elimina il fascio stesso, mentre il fascio coniugato viene focalizzato in un punto diverso dall'immagine ricostruita ed eliminato con un opportuno schermo opaco (metodo della banda laterale unica). Inoltre, la relativamente bassa risoluzione dei pannelli LCD porta anche ad una forte limitazione sull'angolo di visione tridimensionale, dell'ordine dei 2 gradi, problema che è stato alleviato sfruttando opportunamente i fasci di diffrazione di ordine elevato [13, 14].

Oltre alla NHK e al gruppo di Garner, sia in Giappone (p.es.: Sony, Università di Nihon) sia negli Stati Uniti (p.es.: MIT Spatial Imaging Group, New York University Media Research Group, Ford e QinetiQ), vi sono diversi gruppi di ricerca attivi sulle tecnologie di visualizzazione olografiche; al momento, però, non sembra che si possa parlare di prodotti commercializzabili [15].

In ogni caso non esistono ancora visualizzatore volumetrici di caratteristiche adeguate per visualizzare le immagini tridimensionali reali. Pertanto, parte delle caratteristiche positive dell'olografia viene persa, in quanto la visualizzazione dell'immagine virtuale avviene tramite uno schermo e pone limitazioni in termini di posizione di visualizzazione, nel senso che non è possibile osservare l'oggetto a "tutto tondo", cioè da qualsiasi angolazione.

Campionamento e codifica

Si potrebbe pensare che il ricorso a matrici di dati bidimensionali, cioè all'ologramma, per rappresentare immagini tridimensionali, possa essere

Nota 13 - Peraltro brevettato: United States Patent Application 20050286101; Kind Code A1; autori: Garner, Harold R. et al.; 29 dicembre 2005

uno strumento facilmente utilizzabile per la loro trasmissione e memorizzazione.

In realtà, la riproduzione di alta qualità dell'immagine oggetto richiede un'altissima definizione per l'ologramma e conseguentemente una quantità elevata di informazione (dell'ordine di grandezza di 1 TB per ologrammi ad alta risoluzione [15]); peraltro, è possibile ridurre tale quantità di informazione accettando una diminuzione della qualità dell'immagine riprodotta.

Uno dei metodi possibili consiste nel considerare solo una parte dell'ologramma originale sottoponendolo a sottocampionamento [16, 17]. Si noti che il campionamento spaziale effettuato dai sensori CCD (Charged-Coupled Device), comunemente utilizzati in elettro-olografia, è già da ritenersi di fatto un sottocampionamento a causa delle dimensioni delle celle, relativamente grandi rispetto alla risoluzione di una tipica lastra olografica [19].

Fig. 19 – Riproduzione ottenuta con parte di un ologramma [11].

Un altro metodo, che si presta anche alla realizzazione di sistemi scalabili, consiste nel considerare solo una parte dei campioni di un ologramma; la qualità ottenibile per l'immagine riprodotta dipende solo dalla quantità di campioni considerata [18], come illustrato in figura 19.

Si noti che tale caratteristica è anche da ritenersi una forma sfruttabile di protezione "intrinseca" nei confronti degli errori di canale e, in particolare, nei confronti della perdita di pacchetti di dati.

Per quanto riguarda l'effetto della digitalizzazione dei dati, e perciò la conseguente introduzione di un errore di quantizzazione, per avere alcune indicazioni ci si può riferire al lavoro del gruppo di Garner [11] dove si mostra l'effetto di un segnale disturbante additivo

Fig. 20 – Effetti del rumore. Sulle ordinate il valore del coefficiente di correlazione standard tra pixel appartenente all'immagine corretta rispetto al corrispondente pixel dell'immagine rumorosa.

sulla qualità dell'immagine riprodotta (figura 20). Dalla documentazione emerge che questo studio è solo nelle fasi iniziali.

Le caratteristiche statistiche dei campioni ricavati da un ologramma è differente da quella dei campioni ricavati dalle immagini bidimensionali convenzionali, pertanto non è possibile applicare direttamente gli stessi algoritmi di compressione per la diminuzione dell'informazione associata. Gli ologrammi contengono dell'informazione non rilevante ai fini della riproduzione dell'immagine desiderata, che può essere rimossa con un opportuno filtraggio passabanda nel campo delle frequenze. L'applicazione di trasformate ai dati così filtrati risulta una codifica efficace [20, 21].

La ripresa

La ripresa olografica pone diversi problemi quando si esce dai laboratori e ci si propone di riprendere oggetti e scene reali.

La tecnica classica prevede infatti l'illuminamento completo dell'oggetto con un singolo fascio ottico di sezione opportuna; gli oggetti utilizzati in laboratorio sono però di piccole dimensioni e trasparenti (lavoro di Gabor – microscopia elettronica olografica) o comunque con proprietà ottiche adatte.

L'illuminazione di oggetti reali, magari di dimensioni notevoli, non può essere realizzata con le stesse modalità adottate in laboratorio.

Durante il periodo di esposizione, cioè nel lasso di tempo in cui si forma l'immagine sul sensore (modulo CCD o lastra fotografica), la configurazione di ripresa deve rimanere stabile, nel senso che il tragitto della luce componente i fasci ottico e di riferimento non deve variare di più di un quarto della lunghezza d'onda della luce utilizzata: per questo motivo in laboratorio si usano speciali banchi ottici che assicurano un'elevata stabilità dimensionale al sistema di ripresa.

Per riprendere oggetti in movimento si utilizza perciò una tecnica basata su laser pulsati, abbinata a sensori di elevata sensibilità, in genere del tipo CCD. Infatti, utilizzando impulsi molto corti, dell'ordine di pochi nanosecondi, si riescono a riprendere oggetti in movimento anche ad altissime velocità, dell'ordine di Mach 2, poiché questi, durante l'impulso, subiscono uno spostamento molto inferiore alla lunghezza d'onda del laser. Una parte rilevante della tecnica la giocano i sen-

sori CCD a cui bastano poche centinaia di fotoni per generare un segnale utilizzabile [22].

Le tecniche per la ripresa di oggetti di grandi dimensioni non sembrano invece del tutto definite a causa di diversi motivi, tra cui, ad esempio, la limitata lunghezza di coerenza dei fasci laser (negli anni '70 erano di pochi metri [5]) e le limitazioni sulle potenze luminose utilizzabili, se non altro per motivi di sicurezza (l'illuminazione di oggetti estesi può richiedere un'elevata potenza luminosa affinché i sensori ricevano una quantità sufficiente di fotoni, nonostante le perdite lungo il tragitto del fascio e a causa delle caratteristiche ottiche della superficie dell'oggetto ripreso).

Di fatto in bibliografia si definiscono "estesi" oggetti le cui dimensioni sono dell'ordine del metro [23] e anche in questo caso è frequente il riferimento a tecniche olografiche realizzate nel campo delle microonde [7, 24] piuttosto che nel campo ottico. L'uso di microonde rende più agevole l'illuminamento con fasci coerenti di oggetti di grandi dimensioni, ma pone notevoli problemi per quanto riguarda i sensori, che dovrebbero avere dimensioni e complessità eccessive, solo parzialmente compensate dall'adozione di tecniche di apertura sintetica.

Commenti sulla TV olografica

Dall'analisi della documentazione reperita sembra di poter affermare che l'intera catena di generazione, post-produzione, registrazione, trasmissione e visualizzazione delle immagini tridimensionali debba essere ancora definita nei particolari, esistendo al momento solo studi e/o apparati sperimentali molto specifici, dimostratori della fattibilità di principio di alcune funzionalità, ma tra loro non collegati e ancor meno interagenti.

Le attività di standardizzazione sono per il momento ancora molto premature, non se ne accenna in alcuna fonte di informazione, e ciò è un altro segnale della immaturità della tecnologia olografica applicata alla televisione.

Tuttavia, il governo giapponese ha recentemente promosso un'iniziativa di ricerca e sviluppo che coinvolgerà ricercatori statali, universitari e delle aziende, mirata a produrre un sistema televisivo tridimensionale pienamente immersivo entro i prossimi 15 anni [23, 24, 25].

Tale sistema sarà caratterizzato da un ambiente di fruizione interattivo, con riproduzione video tridimensionale, riproduzione sonora, olfattiva e tattile delle scene riprese, tale che l'utente possa posizionarsi a piacimento nello spettacolo o nella manifestazione sportiva trasmessa, guardando, toccando e odorando gli oggetti costituenti la scena.

Tra le applicazioni previste vi è l'home-shopping, ma anche l'effettuazione di operazioni chirurgiche a distanza; i connotati di interattività piuttosto spinti non dovrebbero impedire l'utilizzazione del sistema anche in ambito diffusivo, per esempio per la televisione tridimensionale, in particolare olografica.

4. Altre forme di "olografia"

Il termine olografia viene utilizzato anche, più o meno propriamente, per indicare apparati, sistemi e tecniche che, a volte, poco o punto hanno da spartire con la tecnica inventata da Gabor.

Infatti, in bibliografia si reperiscono informazioni su tecniche che differiscono sostanzialmente da quella basata sull'interferenza ottica, malgrado che vengano chiamate "olografiche". A volte si utilizza il termine olografia nella sua accezione etimologica, senza riferimenti alla tecnica interferometrica sopra descritta, altre si fa solo riferimento alle caratteristiche estetiche delle immagini olografiche.

4.1 Schermi olografici per proiezione

Commercialmente si indicano come schermi olografici degli schermi per retroproiezione trasparenti, caratterizzati dalla presenza, sul retro,

cioè sul lato rivolto al proiettore, di una lente di Fresnel, dall'apparenza di una fitta increspatura di forma prismatica ad andamento regolare.

Tale lente rifrange verso lo spettatore, posto davanti allo schermo, le immagini prodotte da un proiettore ubicato in posizione disassata. In questo modo non solo non si nota il proiettore, ma si evitano anche gli aloni e le disuniformità luminose tipiche della retroproiezione in asse.

Tali schermi, grazie alla loro trasparenza, danno l'impressione che l'immagine si formi sospesa in aria. L'effetto visivo è molto particolare, ed è utilizzato in allestimenti di stand fieristici, locali commerciali e simili, dove si desidera richiamare l'attenzione dello spettatore.

Il riferimento all'olografia compreso nel nome commerciale del prodotto presumibilmente deriva dal fatto che l'immagine, come detto, sembra fluttuare nel vuoto, analogamente all'immagine tridimensionale riprodotta a partire da un ologramma.

4.2 Etichette "olografiche"

Non tutte le etichette definite "olografiche" sono veramente basate su ologrammi.

Infatti commercialmente tale denominazione indica anche prodotti realizzati con altre tecniche – a volte anche integrate con veri ologrammi - caratterizzate dalla capacità di riprodurre immagini tridimensionali, in particolare stereoscopiche, oppure iridescenti.

I cosiddetti ologrammi-prismatici consistono in una coppia di immagini accoppiata ad una pellicola plastica di cui un lato, in genere l'esterno, è composto da una serie di minuscoli prismi. Per effetto della rifrazione ottica, spostando il punto di osservazione si osserva o l'una o l'altra delle due immagini .

Con lo stesso principio, utilizzando una coppia stereoscopica per le immagini e adottando un'opportuna geometria per i prismi, si ottiene l'effetto

Fig. 21 – Esempi di utilizzazione di schermo "olografico" nell'allestimento di una vetrina, una show room e uno stand commerciale. (fonte: www.litscreen.it)

stereoscopico e quindi l'osservatore percepisce la profondità dell'immagine riprodotta .

Un'altra tecnica, che genera immagini iridescenti che ad un'osservazione superficiale possono essere scambiate per ologrammi, consiste nell'incisione laser.

Questa tecnica permette di incidere solchi molto ravvicinati tra loro e con inclinazioni diverse, tali

Fig. 22 – Esempi di visualizzazione immersiva in sistemi CAVE™. (fonte: www.evl.uic.edu/pape/CAVE/DLP/)

che si possono sovrapporre immagini iridescenti visibili da angolazioni differenti.

Anche questo tipo di immagine è difficilmente riproducibile e pertanto anche questa tecnica viene utilizzata nei sigilli di garanzia.

4.3 Holodeck

Nell'universo fantascientifico di Star Trek, l'holodeck è un sistema di realtà simulata, ubicata generalmente su navi o basi spaziali, principalmente per scopi ricreazionali o addestramento.

Nella nostra realtà, il prodotto non sperimentale che si avvicina maggiormente all'holodeck è il CAVE™, un sistema di proiezione ad elevata immersività collegato ad un sistema di realtà virtuale sviluppato originariamente presso l'Electronic Visualization Lab (EVL) , pensato soprattutto per attività addestrativa e analisi di dati.

Successivi sviluppi hanno portato alle attuali soluzioni reperibili sul mercato , in genere caratterizzate da tecnologie di proiezione stereoscopica

Fig. 23 – Illustrazione schematica di sistema CAVE™ con proiezione su quattro pareti. (fonte: www.evl.uic.edu/pape/CAVE/)

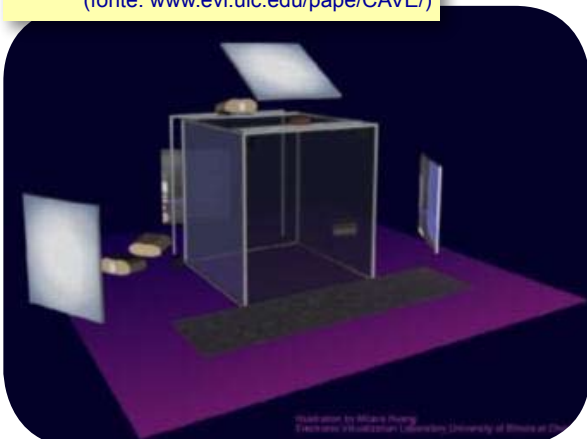



Fig. 24 – Sistema di proiezione immersiva Barco, con proiezione su sei pareti.

ad alta risoluzione sulle pareti e tecnologie per la riproduzione di audio di tipo immersivo.

Un ulteriore possibile sviluppo di questa tecnologia è rappresentato da installazioni con finalità artistiche, ad esempio l'installazione CINE 2.0 (Collaborative Immersive Networked Environment) realizzata presso "The Museum of Television & Radio" in New York (USA)[Nota 14], dove si voleva ottenere un ambiente virtuale completamente immersivo e interattivo, simile in funzionalità all'holodeck di StarTrek, illustrata in figura 25.

In futuro tale tipo di installazioni potrebbe trovarsi più frequentemente, magari anche come dimostratori di tecnologie di intelligenza artificiale (A.I.)[Nota 15] [25, 26, 27].

Tuttavia, l'informazione di profondità delle scene riprodotte dalle immagini proiettate sulle pareti sembra per ora demandata alla stereoscopia, piuttosto che all'olografia, sebbene tale soluzione non sia scartata a priori.

Nota 14 - Installazione realizzata dagli artisti J. Tunik, M. Kirov, H.Riley con Tony Rizzaro e Braden Weeks Earp presso "The Museum of Television & Radio" (MTR) in New York (USA), dal 2 giugno al 31 agosto 2006.
[fonte: http://mtr.org/events/beyondtv]

Nota 15 - Nell'ambito della International Conference on Autonomous Agents [25] si sono trattate tecnologie di intelligenza artificiale in corso di sviluppo che sono necessarie per realizzare sistemi di comunicazione simili all'holodeck di StarTrek.

Fig. 25 – Installazione CINE.

6. Conclusioni

L'olografia è una tecnologia matura in certi campi applicativi, in particolare dove le dimensioni degli oggetti e delle immagini riprodotte non sono elevate (p.es. memorizzazione olografica) e dove la difficoltà di riproduzione degli ologrammi viene sfruttata ai fini di sicurezza anticontraffazione.

Nel campo della visualizzazione pura, in particolare per sistemi di televisione, si incontrano problemi tecnici notevoli, al momento non ancora del tutto risolti.

Perciò è lecito pensare che l'introduzione di tali sistemi non possa avvenire prima di 15-20 anni, non ostante l'attività di sviluppo condotta da diversi gruppi di ricerca qualificati, soprattutto statunitensi e giapponesi [28, 29, 30].

Bibliografia

1. Vocabolario della lingua italiana – Treccani
2. J.W. Goodman, An Introduction to the Principles and Applications of Holography, Proceedings of the IEEE, Vol. 59, No. 9, september 1971
3. Perucca, Dizionario di ingegneria, UTET
4. F. Alberico, Che cos'è l'olografia, Elettronica e Telecomunicazioni, Anno XXV, n. 5, 1976
5. D. Gabor, Holography, 1948-1971, Proc. IEEE, vol. 60, no. 6, June 1972
6. E.N. Leith, J. Upatnieks, Recontructed wavefronts and communication theory, J. Opt. Soc. Am., Vol. 52, Oct. 1962
7. R.P. Dooley, X-Band Holography, Proc. IEEE, Vol. 53, Issue 11, November 1965
8. T. Ito, Color electroholography by three colored reference lights simultaneously incident upon one hologram panel, Optic Express, vol. 12, no. 18, 6 settembre 2004
9. M.L. Huebschman, B. Munjuluri, H.R. Garner, Dynamic holographic 3-D image projection, Optic express, Vol. 11, No. 5, 10 marzo 2003

10. B. Munjuluri, M.L. Huebschman, H.R. Garner, Rapid hologram updates for real-time volumetric information displays, Applied Optics, vol. 44, Issue 24, pp. 5076-5085, 2006

11. Dymanic Holography for scientific uses, military heads up display and even someday HoloTV Using TI's DMD, http://innovation.swmed.edu/research/instrumentation/res_inst_dev3d.html

12. M. Huebschman, B. Munjuluri, H. Garner, Digital micromirrors enable holographic video display, Laser Focus World, Maggio 2004

13. T. Mishina, M. Okui, F. Okano, Stereoscopic Display through Electro-Holograpy, NHK STRL Broadcast Technology, no. 25, Winter 2006,

14. T. Mishina, M.Okui, F. Okano, Viewing-Zone Enlargement Method for Sampled Hologram that uses High-Order Diffraction, Applied Optics, Vol. 41, Issue 8, pp. 1489-1499

15. D.H. Freedman, Holograms in Motion, MIT Technology Review, novembre 2002, http://www.technologyreview.com/read_article.aspx?id=12990

16. A.M. Bruckstein, R.J. Holt, A.N. Netravali, Hologaphic Image Representations: the Subsampling Method, Proceedings of the International Conference on Image Processing, Volume 1, 1997.

17. R. Dovgard, Hologaphic Image Representation With Reduced Aliasing and Noise Effects, IEEE Trans. On Image Processing, vol. 13, no. 7, July 2004

18. A.M. Bruckstein, R.J. Holt, A.N. Netravali, Holographic Representation of Images, IEEE Trans. On Image Processing, vol. 7, no. 11, November 1998

19. A. Baldi, F. Ginesu, Applicazione degli algoritmi di super risoluzione alla olografia digitale, Associazione Italiana per l'Analisi delle Sollecitazioni, XXXIV Convegno Nazionale, 14-17 settembre 2005, Politecnico di Milano

20. I. Yoshihiro, F. Toshiaki, K. Tadahiko, T. Masayuki, Bit allocation in the transform coding of hologram patterns, Proc. SPIE, vol 3637, marzo 1999

21. Y. Seo, H. Choi, D. Kim, Lossy coding technique for digital holographic signal, Optical Engineering, Vol. 45, Issue 6, 065802, giugno 2006

22. Z. Liu, M. Centurion, G. Panotopoulos, J. Hong, D. Psaltis, Holographic recording of fast events on a CCD camera, Optics Letters, Vol. 27, No. 1, Gennaio 2002

23. J. Watson, S. Alexander, G. Craig, D.C. Hendry, P.R. Hobson, R.S. Lampitt, J.M. Marteau, H. Nareid, M.A. Player, K. Saw, K. Tipping, Simultaneous in-line and off-axis subsea holographic recording of plankton and other marine particles, Meas. Sci. Technol. 12, no. 8, Agosto 2001

24. N.H. Farhat, W.R. Guard, Holographic Imaging at 70GHz, Proceedings IEEE, Dicembre 1970

25. R. Hill, J. Gratch, W. L. Johnson, C. Kyriakakis, C. LaBore, R. Lindheim, S. Marsella, D. Miraglia, B. Moore, J. Morie, J. Rickel, M. Thiébaux, L. Tuch, R. Whitney, J. Douglas, W. Swartout, Towards the holodeck: integrating graphics, sound, character and story, Proceedings of the fifth international conference on Autonomous agents, Montréal, Quebec, Canada, 2001, ACM Press, ISBN:1-58113-326-X

26. R. Aylett, Towards the Holodeck: a Socially Contrained Planner for Synthetic Characters, http://planning.cis.strath.ac.uk/plansig/pastsigs/edinburgh-20/aylett.pdf

27. Il museo delle pure forme, PERCRO Scuola Superiore S.Anna, Pisa

28. I. Fulco, Il televisore olografico? In Giappone, ma nel 2020, La Stampa Web, http://www.lastampa.it/redazione/news_high_tech/archivio/0508/televisore.asp

29. Redazione ECPlanet, TV giapponese in 3D, http://www.ecplanet.com/canale/tecnologia-2/hi_tech-137/0/0/19830/it/ecplanet.rxdf;

30. M. Lucente, Interactive three-dimensional holographic displays: seeing the future in depth, "Current, New, and Emerging Displays Systems", SIGGRAPH Computer Graphics, maggio 1997; http://alumni.media.mit.edu/~lucente/pubs/CG97/

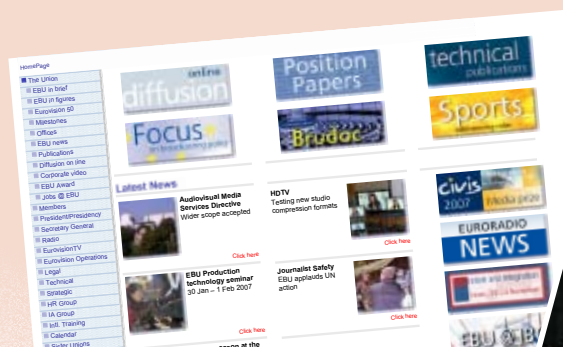
HDTV

sessione per la realizzazione di sequenze di test

Giancarlo **De Biase,** Massimo **Visca**,
Rai - Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica

Nella settimana dal 4 al 7 dicembre il Centro Ricerche ha ospitato una sessione per effettuare riprese destinate alla realizzazione di sequenze di test secondo i diversi formati HDTV da studio: 1080p/50, 720p/50, 1080i/25 e 1080p/25.

Questa attività si è svolta nell'ambito di un progetto tecnico dell'EBU, l'Unione Europea dei Radiodiffusori, per la valutazione dei diversi formati di compressione proposti per i futuri ambienti di produzione HDTV.

La telecamera in grado di acquisire i diversi formati previsti per le sequenze di test al Centro Ricerche Rai.

La notizia relativa alla realizzazione di sequenza di test HDTV sul sito dell'EBU (www.ebu.ch/en/union/news/2006/tcm_6-48649.php)

Sequenze di test

In una normale catena televisiva sono necessarie diverse forme di manipolazione del segnale video; casi tipici sono la compressione del segnale in fase di acquisizione, post-produzione e archivio, l'introduzione di effetti ed elementi grafici, la correzione di colore, la compressione del segnale a diversi bit rate per alimentare le catene di contribuzione e diffusione e, quando necessario, le conversioni di standard.

Tutte queste operazioni introducono sul segnale video distorsioni che, sommandosi nella catena, possono pregiudicare la qualità finale disponibile all'utente.

E' quindi importante analizzare le prestazioni dei singoli algoritmi utilizzati nei diversi apparati tramite prove sistematiche e ripetibili, consistenti nell'applicazione dell'algoritmo in esame su opportune sequenze di test, secondo catene di riferimento che simulano i principali processi produttivi. Un esempio di tali prove è descritto in [1].

E' evidente che il confronto delle prestazioni di algoritmi proposti sul mercato da costruttori diversi comporta importanti implicazioni commerciali. E' quindi necessario che i test vengano svolti utilizzando diverse sequenze in grado di coprire tutte le caratteristiche tecniche e di contenuto ed essere al contempo "agnostiche" rispetto all'algoritmo in esame, in modo da evidenziarne prestazioni e limiti senza offrire spazi eccessivi a critiche mirate a screditare la correttezza dell'impostazione del test e dei conseguenti risultati.

Alcune fasi della realizzazione delle riprese, per l'allineamento della camera, la scelta della inquadratura, l'acquisizione delle sequenze.
Da sinistra a destra Jacek Zygadlo (TVP), responsabile del setting di telecamera e luci, Massimo Visca (Rai), responsabile per l'organizzazione della sessione di acquisizione presso il Centro Ricerche, Hans Hoffman (EBU), supervisore per l'EBU, e Ana Shpuza, la volontaria che ha collaborato per la realizzazione di alcune delle sequenze di test.

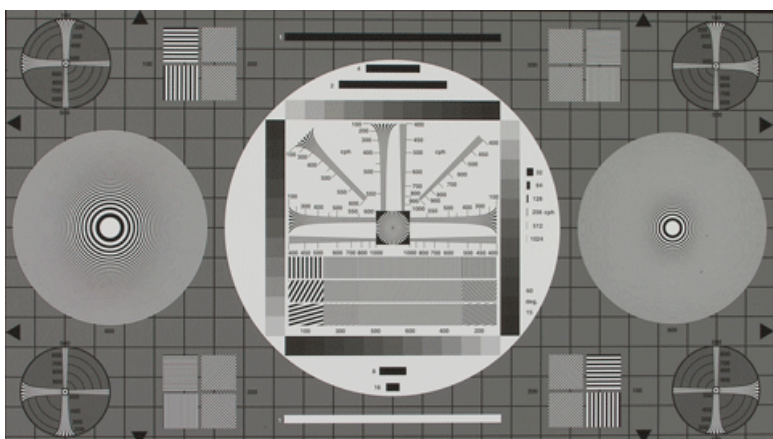
Un buon *portfolio* deve quindi essere formato da sequenze di test aventi le seguenti caratteristiche:

- essere generate in condizioni documentate e ripetibili;
- coprire le diverse caratteristiche delle immagini televisive in termini di dettaglio, movimento, colorimetria, contrasto;
- includere oggetti sia naturali sia artificiali, rappresentando elementi e situazioni di facile leggibilità ed interpretazione anche per gli osservatori inesperti, al fine di poter utilizzare le sequenze per effettuare eventuali prove soggettive; a tale scopo risultano particolarmente interessanti i cosiddetti “skin tones”, cioè le caratteristiche di dettaglio e colorimetria della pelle umana, in quanto particolarmente critiche sia dal punto di vista della codifica sia da quello della severità del giudizio dell’osservatore dell’immagine elaborata;
- coprire le diverse condizioni di ripresa, indoor e outdoor, e quindi diversi generi televisivi;
- contenere sequenze che, secondo la celebre definizione della Rac. ITU-R BT.500 [2], siano “critical but not unduly so”, frase traducibile in “critiche ma non troppo”; l’intenzionale genericità ed astrattezza della definizione sottolineano la mancanza di criteri oggettivi per la selezione delle sequenze, che risulta quindi affidata alla professionalità ed esperienza del progettista del test.

Tre esempi di immagini HDTV acquisite per soddisfare i criteri al fine di divenire parte integrante del portfolio di sequenze di test EBU/UER.

La lunghezza tipica delle sequenze di test è pari a 10 sec., in quanto tale durata rende possibile un loro utilizzo anche per effettuare prove soggettive formali, secondo i protocolli sperimentali maggiormente utilizzati tra quelli stabiliti nella già citata BT.500.

Le riprese effettuate presso il Centro Ricerche ed Innovazione Tecnologica sono state progettate per essere particolarmente significative per l'analisi degli algoritmi di compressione HDTV per applicazioni da studio, dove si suppone vengano utilizzati bit rate elevati e che gli algoritmi risultino robusti anche a valle di molti processi di compressione; a tal fine sono stati utilizzati oggetti ricchi di dettaglio e colori.

Due altri esempi di immagini HDTV e, in basso, uno dei test pattern per valutare la risoluzione del sistema.

Inoltre, tutti i set realizzati sono stati ripresi utilizzando i formati HDTV maggiormente utilizzati oggi ed in futuro, ed in particolare tutte le sequenze sono disponibili nei seguenti formati:

- 1080p/50
- 1080p/25 con e senza utilizzo di shutter
- 1080i/25
- 720p/50

Data l'impossibilità di effettuare riprese utilizzando due formati diversi in contemporanea, ogni ripresa è stata ripetuta utilizzando un formato diverso ma mantenendo per quanto possibile identiche le condizioni di ripresa (luci, diaframma etc), le caratteristiche del movimento degli oggetti e delle persone poste di fronte alla telecamera ed i movimenti della telecamera stessa.

Le riprese effettuate consentono di arricchire notevolmente la libreria di sequenze di test disponibili in ambito EBU/UER rendendo per la prima volta disponibili sequenze estremamente simili nei diversi formati, compreso il formato 1080p/50, che fino ad ora non era disponibile in nessuna libreria.

E' ragionevole ritenere che alcune di queste sequenze diventeranno "benchmark" utilizzati in tutti i centri di ricerca e sviluppo per analizzare ed ottimizzare i presenti e futuri algoritmi di elaborazione di immagini HDTV, raccogliendo l'eredità delle gloriose sequenze SDTV del passato, quali per esempio "Mobile & Calendar" o la famosa "Renata&Butterfly", realizzata anch'essa presso il Centro Ricerche Rai.

Camera e ottiche

Per effettuare le riprese sono stati utilizzati apparati allo stato dell'arte; si ribadisce infatti che lo scopo delle riprese era quello di generare immagini di test utilizzando i migliori apparati disponibili e non di analizzare le prestazioni degli apparati utilizzati in fase di ripresa.

Ottiche

Canon Primes in Alta Definizione Serie FJS: 5mm, 9mm, 14mm, 24mm, 35mm, 55mm, corredate da un Mattebox cinematografico.

Telecamera

SONY HDC-1500, in grado di acquisire in tutti i formati oggetto del test:

- 1080p/50 (interfaccia dual link disponibile sulla testa camera); 1080p/25; 1080i/25; 720p/50

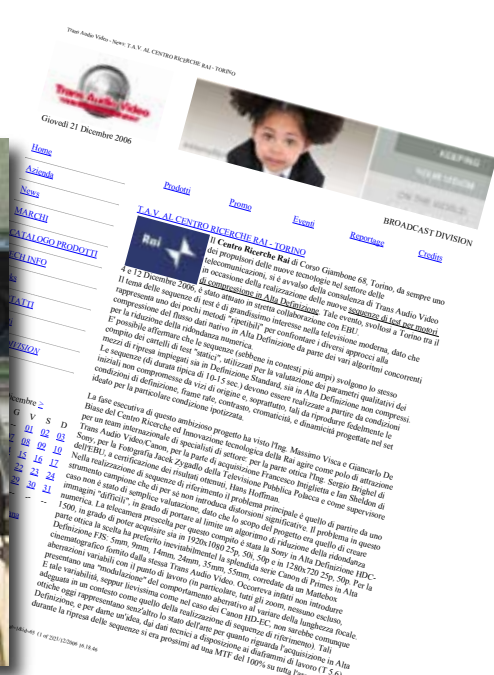
La telecamera è stata allineata prima del test dal personale SONY e la configurazione della stessa è stata concordata tra tutti i partecipanti alle riprese.

Ringraziamenti

Le riprese non sarebbero state possibili senza l'aiuto e la collaborazione di Trans Audio Video che ha fornito le ottiche e la fondamentale consulenza dell'Ing. Sergio Brighel e di SONY Italia che ha fornito la telecamera e la preziosa consulenza di Francesco Intiglietta e Ian Sheldon.

Bibliografia

1. M. Visca: “Prove EBU sui nuovi formati di videoregistrazione DVCPRO e BETACAM SX”; Elettronica e Telecomunicazioni, n. 2, agosto 1999.
2. Rec. ITU-R BT.500-11, “Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures”, (1974-1978-1982-1986-1990-1992-1994-1995-1998-2000-2002).

Alcune fasi preliminari per l'installazione degli apparati utilizzati.
Giancarlo De Biase e la telecamera utilizzata per le riprese.

Pagina web che descrive in dettaglio le caratteristiche degli apparati utilizzati
(www.transaudiovideo.com/news.asp?cat=1&id=65)

Il Laboratorio Ricerche

Quarantacique anni fa, il 2 febbraio 1961,
veniva inaugurata l'attuale sede del
Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica della Rai,
a quel tempo denominato Laboratorio Ricerche.

Il Laboratorio era stato costituito a Torino nel 1930
dall'EIAR (Ente Italiano per le Audizioni Radiofoniche).

1958: si pongono le fondamenta del nuovo Laboratorio Ricerche Rai

1960: l'edificio è terminato

La sperimentazione Rai a Torino

Il riconoscimento all' IBC 2006

Amsterdam, 10 settembre 2006
da sinistra: Gino Alberico, Mario Stroppiana e Alberto Morello (Direttore del Centro Ricerche Rai) ricevono l'attestato da Michael Bunce (Chairman IBC Partnership Board)

L'"Innovation Judges' Award" è il più prestigioso dei quattro riconoscimenti all'innovazione introdotti quest'anno dall'IBC (International Broadcasting Convention, www.ibc.org): premia applicazioni tecnologiche in cui convergano la creazione, la gestione e la distribuzione di contenuti in termini innovativi e che comportino benefici notevoli per gli utenti.

Il riconoscimento è stato assegnato a Infront Media and Host Broadcast Services (HBS) per la Produzione New Media per la 2006 World Cup.

Al secondo posto troviamo il progetto del Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica della Rai, che ha consentito di sperimentare durante i Giochi Olimpici Invernali di Torino 2006 la trasmissione mediante un unico canale DTT (per la televisione digitale terrestre) di un programma HDTV e della TV Mobile nell'area di Torino e di alcuni dei siti nelle Montagne Olimpiche [1,2,3]. Al progetto hanno collaborato, con la Direzione Strategie Tecnologiche, la Produzione Rai, RaiWay, ed i partner tecnologici ADB, CVE, Eutelsat, Irdeto, Panasonic, ST, Tandberg.

Il riconoscimento, assegnato da una giuria di giornalisti della stampa specializzata internazionale, è stato consegnato ad Alberto Morello, direttore del Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica della Rai, nel corso della cerimonia tenuta il 10 settembre presso il Park Foyer del centro fieristico di Amsterdam.

Riferimenti Bibliografici

1. "HDTV e TV Mobile, scintille di passione a Torino", Elettronica e Telecomunicazioni, anno 55, n. 1, aprile 2006.
2. A. Morello: "HD Olympics", DVB-scene, No. 17, March 2006, www.dvb.org
3. A. Morello, G. Alberico, M. Stroppiana: Rai HDTV and DVB-H Trials during the Turin Winter Olympics, IBC 2006 Conference, Amsterdam, September 2006

Che cosa è, come funziona:

Interfacce video

(SDI, SDTI, ASI, HD-SDI, DVI, HDMI)

Marzio **Barbero &** Natasha **Shpuza**

1. Premessa

Due schede precedentemente pubblicate trattano dei formati per i segnali video digitali a definizione standard [1] e ad alta definizione [2]. Le raccomandazioni ITU oggetto delle schede definiscono i parametri fondamentali per rappresentare le immagini, quali la struttura e la frequenza di campionamento, il numero di quadri al secondo e il numero di righe che costituiscono ciascuna immagine. Non si occupano, invece, di definire le modalità e le caratteristiche elettriche necessarie per interfacciare i vari apparati che, grazie alla catena di produzione, e attraverso la catena di trasmissione, consentono la visione delle immagini a casa dell'utente.

Inizialmente, dopo la pubblicazione nel 1982 della Raccomandazione ITU-R BT.601 [3], il problema dell'interfacciamento di tipo digitale si poneva esclusivamente nell'ambiente di produzione, poiché, a quel tempo, il segnale video diffuso era ancora esclusivamente analogico e l'interfacciamento fra gli apparati video domestici era assicurato dalla SCART (§ 5.1).

Le interfacce per la produzione furono definite dagli standard 125M della SMPTE per i sistemi televisivi a 525 righe e dalle specifiche tecniche EBU Tech 3267 per i sistemi a 625 righe. Entrambe le specifiche confluirono nella Raccomandazione ITU-R BT.656 pubblicata nel 1986: l'attuale versione, 656-4, è del 1998 [4].

Successivamente sono state definite interfacce adatte per l'interconnessione di apparati anche in alta definizione, sia in ambito professionale (HD-SDI) che domestico (DVI, HDMI).

2. Raccomandazione 656

2.1 Interfaccia parallela

A causa delle limitazioni della velocità dei circuiti integrati utilizzati all'epoca, le prime interfacce erano di tipo parallelo, richiedevano cavi costituiti da 11 doppini (*twisted pair*), 10 per ciascuno dei bit relativi all'informazione video più uno per il clock. Il connettore specificato è a 25 contatti (figura 1) e la lunghezza del cavo può raggiungere 50 m senza equalizzazione e 200 m con appropriata equalizzazione. I dati video adottano il semplice codice di linea NRZ (figura 6) dove i simboli 0 e 1 sono associati ai due livelli del segnale.

I campioni di luminanza e crominanza sono multiplati (C_B, Y, C_R, Y) e quindi il clock sincrono è a 27 MHz (figura 2). La tecnologia da utilizzare per *driver* e *receiver* non è specificata dalla norma, ma deve essere compatibile con la famiglia logica ECL, pertanto l'impedenza di uscita del driver della linea bilanciata e la terminazione della linea, all'ingresso del receiver, sono da 110 Ω.

Quando furono per la prima volta interconnessi apparati dotati di queste interfacce, ci si rese conto che la scelta di 13,5 MHz come frequenza di campionamento aveva un inconveniente: la 9ª e la 18ª armonica coincidono esattamente con 121,5 MHz e 243 MHz, canali di emergenza per l'areonautica. La scelta di questa frequenza era stata il risultato di un compromesso fra diverse proposte, e quindi non era pensabile riconsiderare il valore scelto: per limitare le possibili conseguenze di emissioni spurie a tali frequenze ci si affida a indicazioni rigorose nella progettazione degli apparati e nella cura dei collegamenti.

Fig. 1 - Connettori 25-pin D-subminiature

Successivamente, SMPTE definì la norma 267M (*Bit-parallel Digital Interface - Component Video Signal 4:2:2 16x9 Aspect Ratio*) per consentire il trasferimento di immagini costituite da 960 × 480 elementi e con formato 16:9 e la norma 244M (*System M/NTSC Composite Video Signal - Bit/ Parallel Digital Interface*) per il trasferimento di segnali digitali derivati direttamente dal segnale composito NTSC, con frequenza di campionamento pari a quattro volte la sottoportante di colore.

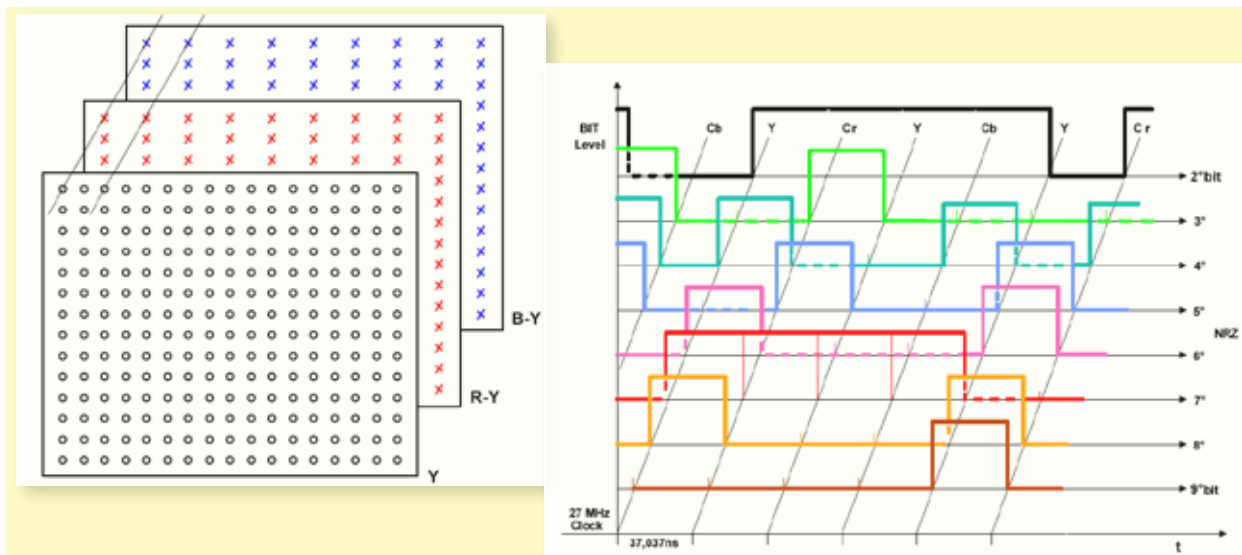



Fig. 2 - In base alla BT.601 il video è campionato secondo la struttura rappresentata a sinistra: ai campioni di luminanza corrisponde una frequenza di 13,5 MHz, a ciascuna delle due componenti di crominanza una frequenza di 6,75 MHz. I due campioni di crominanza sono coposizionati con i campioni di ordine dispari della luminanza.
La BT.656 prevede per l'interfaccia parallela che i dati (8 o 10 bit per campione ed il segnale di clock) relativi ai campioni video siano multiplati, come rappresentato nella figura di destra, nel seguente ordine: C_B, Y, C_R, Y, C_B, Y, C_R, Y, ...
Il clock sincrono è a 27 MHz, corrispondente ad un periodo di 37,037 ns.

2.2 Sincronismi analogici e sincronismi digitali

Per consentire la conversione del segnale video da analogico a digitale e viceversa occorre stabilire univocamente la corrispondenza tra i sincronismi analogici (di quadro, semiquadro e riga) e le informazioni digitali (figura 3).

I sincronismi di riga e di quadro sono sostituiti con due sequenze di 4 parole di 10 bit: SAV e EAV (figura 4).

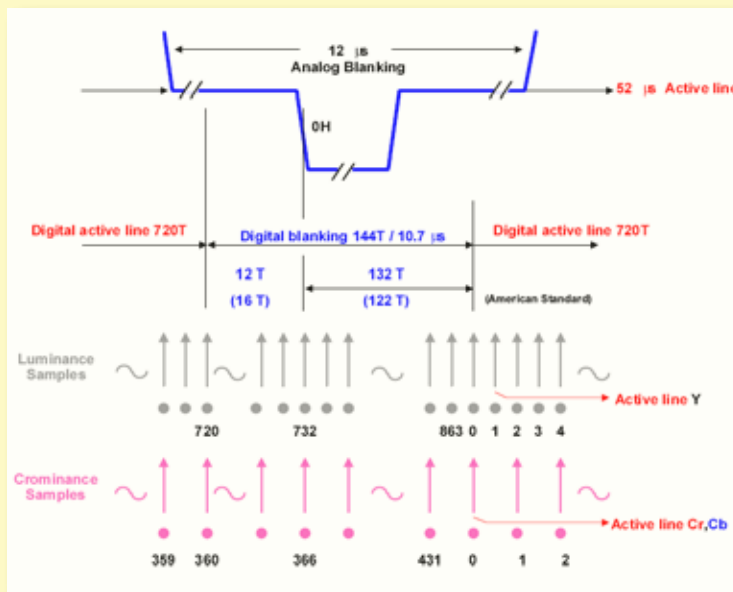
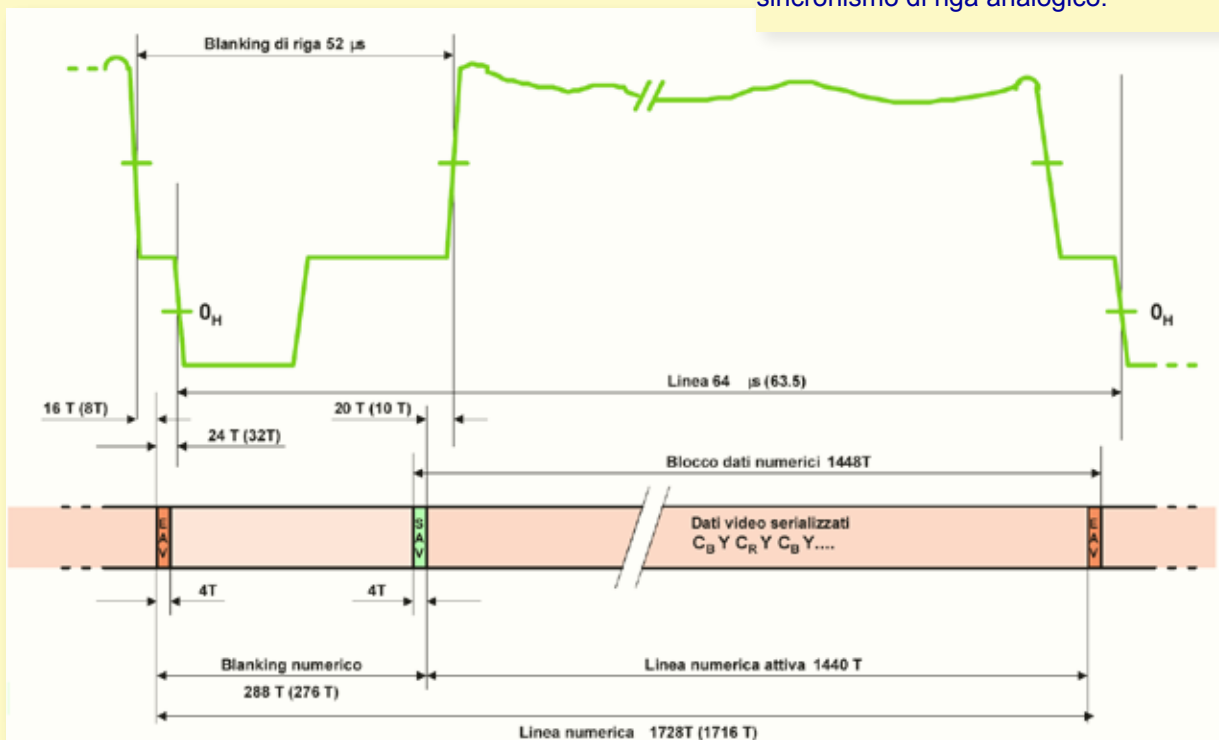



Fig. 3 - Corrispondenza fra i sincronismi digitali e quelli del segnale analogico. Il primo campione della riga attiva digitale è identificato come campione 0, l'ultimo campione è 863 nel caso del formato a 625 righe (857 nel caso di quello a 525 righe). L'intervallo di cancellazione di riga corrisponde a 288 periodi di campionamento (276 in quello a 525 righe). Come illustrato nel dettaglio nella figura in alto, il campione corrispondente all'istante O_H (il riferimento per il sincronismo di riga nel segnale analogico) è quello 732 (736) per la luminanza Y e il 366 (368) per le due componenti di crominanza C_B e C_R. Nella figura in basso è evidenziata la corrispondenza temporale fra i segnali di riferimento digitali SAV e EAV con il sincronismo di riga analogico.

Il tempo relativo ai restanti campioni della cancellazione di riga (cioè 282 parole nel caso del formato 625/50) è utilizzabile per dati aggiuntivi (*ancillary data*).

2.3 Interfaccia seriale (SDI)

L'interfaccia di tipo parallelo non era praticamente utilizzabile, per realizzare studi televisivi complessi, e quindi l'obiettivo era la definizione di una interfaccia di tipo seriale, che potesse sfruttare le infrastrutture già presenti, basate su cavi coassiali con impedenza a 75 Ω e connettori di tipo BNC (figura 5).

Inizialmente fu sperimentata un'interfaccia seriale in cui la codifica di canale era basata su un codice a gruppo 8/9 (supportava quindi solo 8 bit per campione video), successivamente fu proposto e adottato un sistema basato sull'uso del codice NRZI (figura 6) e di scrambler (figura 7). Lo scrambler opera sui dati codificati a 10 bit e fa si che i dati assumano una statistica pseudocasuale, caratterizzata da un elevato numero di transizioni: in questo modo è possibile recuperare in ricezione il sincronismo di clock, senza aggiunta di ridondanza.

L'interfaccia di tipo seriale, sempre specificata in ITU-R BT.656, è nota comunemente come SDI (*Serial Digital Interface*) e supporta la codifica a 10 bit del formato 4:2:2 con formato d'immagine a 720 pixel attivi per riga (270 MHz) e con formato 16/9 a 960 pixel (360 MHz). Per trasferire un segnale progressivo sono necessari due connessioni BT.656.

Fig. 4 - SAV (*Start of Active Video*) e EAV (*End of Active Video*) sono i segnali di riferimento, il primo all'inizio di ogni blocco di dati video ed il secondo alla fine del blocco. Ciascun segnale è costituito da quattro parole nel formato come indicato nella prima tabella. Le prime tre parole sono un preambolo fisso costituito da una parola di bit 1 e due parole di bit 0 (queste parole non sono utilizzabili, così come specificato dalla BT.601, per rappresentare informazioni video). Poiché la prima realizzazione dell'interfaccia era a 8 bit, quando è stata estesa a 10 bit, la norma ha indicato come non definiti il valore dei due bit meno significativi, per compatibilità con gli apparati preesistenti, operanti a 8 bit.

Posizione del bit	Prima parola	Seconda parola	Terza parola	Quarta parola
9 (MSB)	1	0	0	1
8	1	0	0	F
7	1	0	0	V
6	1	0	0	H
5	1	0	0	P_3
4	1	0	0	P_2
3	1	0	0	P_1
2	1	0	0	P_0
1	1	0	0	0
0	1	0	0	0

Per la quarta parola il significato dei bit è quello schematizzato nella seconda tabella: F=0 durante il semiquadro 1 (dalla riga 1) e 1 durante il semiquadro 2 (dalla riga 313, si riportano i dati validi per il formato a 625 righe); V=1 durante l'intervallo di cancellazione di quadro (dalla riga 624 alla riga 23 e dalla riga 311 alla riga 336) mentre è 0 durante le righe video attive; H=0 identifica SAV e H=1 identifica EAV. P_0, P_1, P_2 e P_3 sono bit di protezione, calcolati in base al valore di F, V e H secondo la tabella in basso (il codice consente la correzione degli errori singoli e la rivelazione di quelli pari).

numero di riga video formato 625/50	F	V	H (SAV)	H (EAV)
1-22	0	1	1	0
23-310	0	0	1	0
311-312	0	1	1	0
313-335	1	1	1	0
336-623	1	0	1	0
624-625	1	1	1	0

F	V	H	P_3	P_2	P_1	P_0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	1	1	0	1
0	1	0	1	0	1	1
0	1	1	0	1	1	0
1	0	0	0	1	1	1
1	0	1	1	0	1	0
1	1	0	1	1	0	0
1	1	1	0	0	0	1

Il segnale video seriale, oltre che su cavo coassiale, può essere trasportato su fibra ottica [5].

La norma SMPTE 259M (*SDTI Digital Signal/ Data - Serial Digital Interface*) prevede anche l'uso per il trasporto di NTSC composito campionato $4f_{sc}$ a 143 Mbit/s, mentre nel caso di PAL composito campionato a quattro volte la sottoportante di colore opera a 177 Mbit/s. La norma SMPTE 259M supporta fino ad otto canali audio digitali AES/EBU.

Fig. 5 - connettore BNC per cavo coassiale.

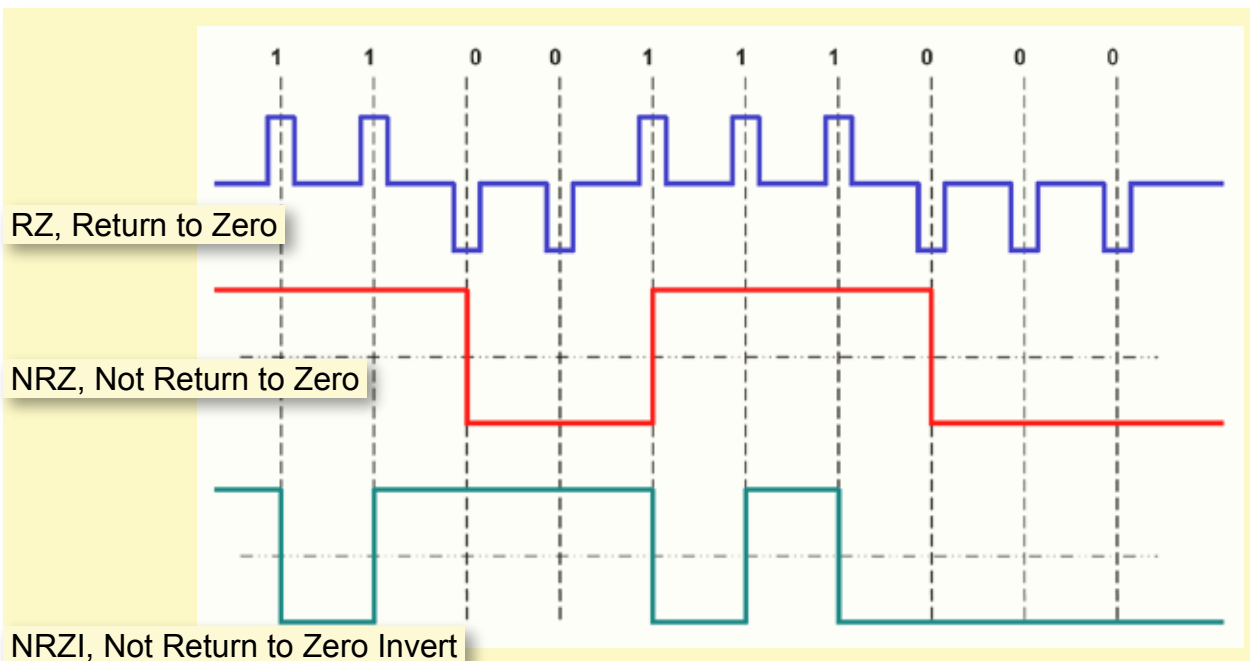



Fig. 6 - Uno dei primi codici di canale utilizzato, in particolare anche per la registrazione dei dati sui primi floppy disk in campo informatico, è stato il codice RZ (*Return to Zero*). In tale applicazione, la corrente di registrazione assume uno stato zero in assenza di bit di informazione, mentre fluisce in una direzione nel caso di bit 1 e nella direzione opposta nel caso di bit 0. Un segnale di questo tipo ha ottime caratteristiche dal punto di vista della rigenerazione del clock, ma non garantisce un buon sfruttamento della banda e ha scarse prestazioni dal punto del rapporto segnale/rumore (la soglia di decisione non è a meta tra i due valori estremi).
Per risolvere questi problemi si può utilizzare il codice NRZ (*Non-Return to Zero*), in questo caso la corrente fluisce in una direzione oppure nell'altra a seconda del valore del bit. I limiti di questo codice sono dovuti al ridotto numero di transizioni (difficile estrazione del clock) e al fatto che ogni qual volta il bit passa da 0 a 1 o da 1 a 0 viene cambiata la polarità del segnale: se si perde un impulso risultano sbagliati non solo il bit immediatamente successivo, ma tutti i bit da tal punto in avanti risultano invertiti (propagazione dell'errore).
Il codice NRZI (*Non-Return to Zero Invert*), risolve il problema della propagazione degli errori assegnando l'evento inversione di polarità alla presenza del simbolo 1, mentre al simbolo 0 corrisponde la mancanza di inversione di polarità. Anche in questo caso, però, il numero di transizioni può essere talmente basso (nel caso di lunghe sequenze di 0) da rendere difficile il recupero del clock.

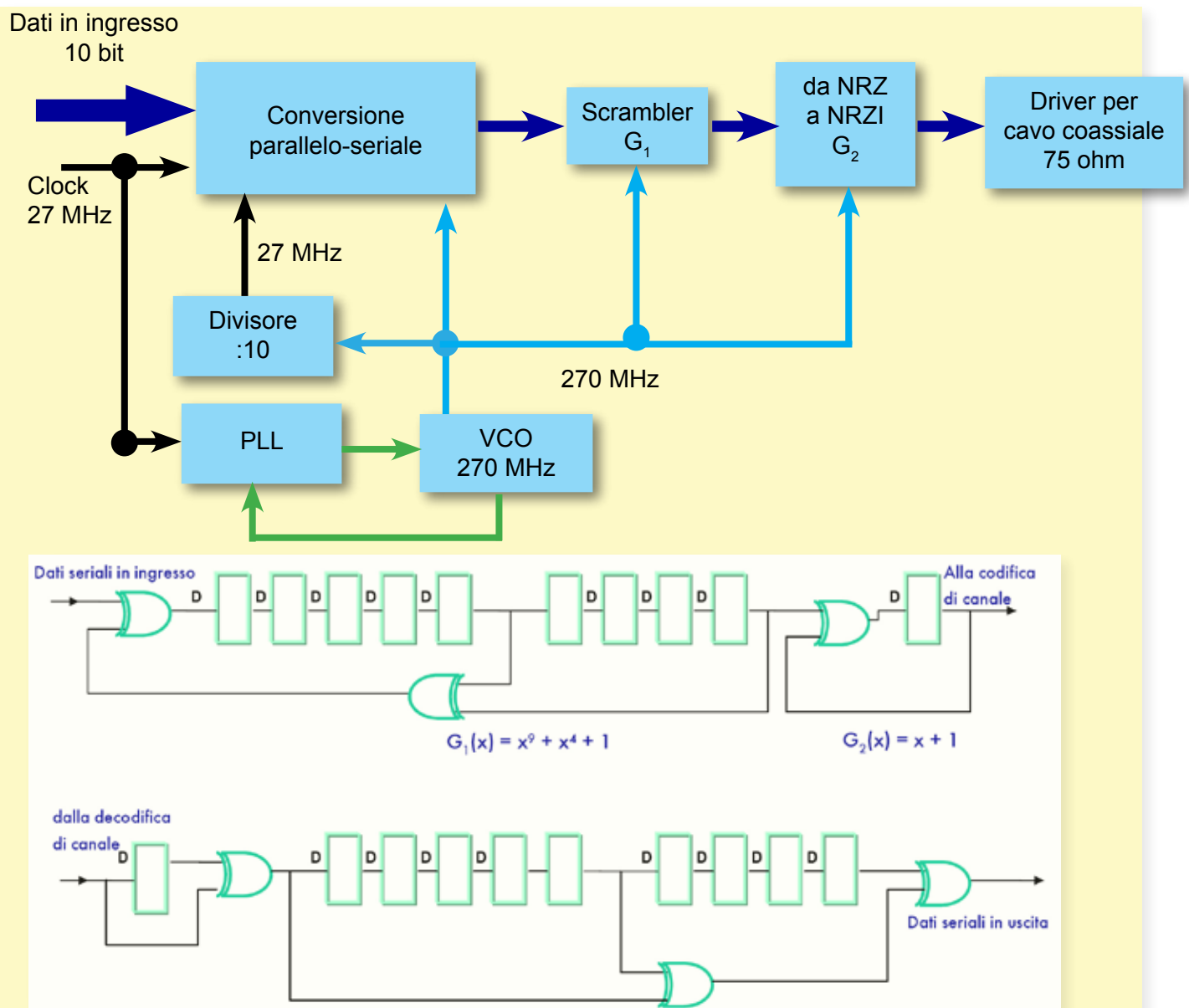



Fig. 7 - La codifica NRZI più scrambler è utilizzato nell'interfaccia seriale SDI.
La codifica NRZI ha dei vantaggi rispetto alle altre soluzioni, compresi i codici a gruppo, per quanto riguarda l'immunità al jitter. D'altro canto lo spettro è più ampio e non ha un'elevata componente spettrale in corrispondenza con la frequenza di clock. Lunghe sequenze di simboli 0 e 1 nel caso dello NRZ e di 0 nel caso di NRZI non presentano commutazioni: può pertanto risultare molto difficile il recupero della frequenza di clock.
La soluzione è la somma logica (XOR) di una sequenza pseudocasuale ai dati prima della codifica di canale.
Una sequenza pseudocasuale è tale se i simboli 0 e 1 sono equiprobabili e hanno statistica simile a quella ottenibile a partire da un generatore di rumore.
E' possibile ottenere una sequenza con statistica pseudocasuale utilizzando un circuito semplice basato su polinomi generatori, gli stessi utilizzati per i codici ciclici CRC. Una volta sommata la sequenza pseudocasuale i dati risultanti hanno una statistica anch'essa di tipo causale, quindi il flusso è caratterizzato da un elevato numero di transizioni e può quindi essere utilizzata una codifica tipo NRZI. L'operazione di somma della sequenza pseudocasuale è spesso indicata come *scrambling* (il verbo inglese *to scramble* corrisponde all'italiano "strapazzare").
In ricezione viene sommata la stessa sequenza pseudocasuale (XOR) ottenendo il flusso di dati originali.
Lo scrambler basato su un polinomio di grado 9 è applicato ai dati NRZ nell'interfaccia seriale per il video digitale SDI, seguito da un secondo scrambler di grado 1 per ottenere la sequenza NRZI priva di polarità.

3. Interfacce seriali per il trasporto del video compresso

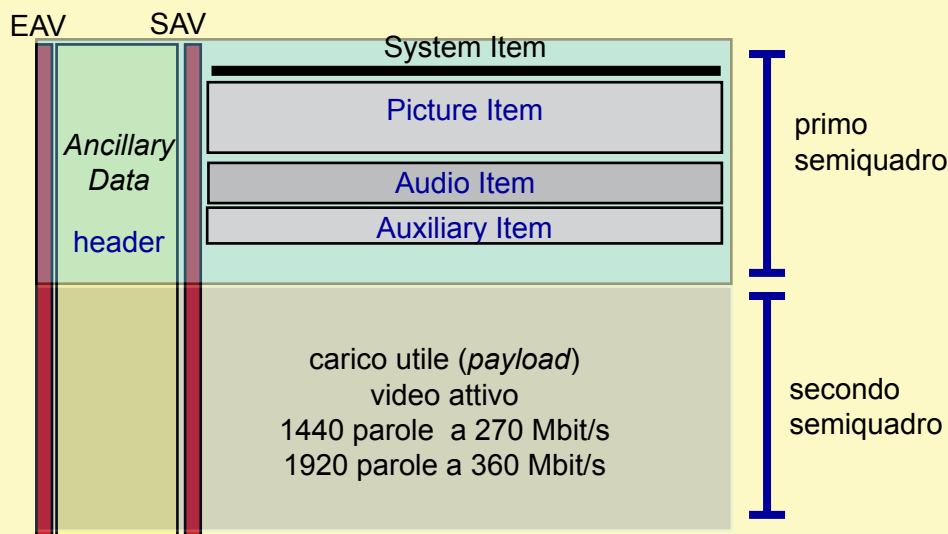
3.1 SDTI

Successivamente furono sviluppati sistemi di compressione dell'informazione video, codec e videoregistratori, e ci si pose il problema di interfacciare apparati utilizzanti lo stesso sistema di compressione e formato dati. Infatti l'uso di una interfaccia SDI presuppone che i dati video siano nel formato non compresso BT.601. Il suo utilizzo con informazioni video compresse implica quindi operazioni di co-decodifica in cascata, al solo scopo di interfacciare apparati, anche nel caso questi adottino lo stesso sistema di compressione e formato dati. Poiché i sistemi di compressione utilizzati generalmente non sono trasparenti, comportano una perdita di informazione e un degradamento della qualità video, non giustificato dalla sola esigenza di interfacciamento e di riversamento dei segnali.

Per ovviare a tale limitazione della SDI, la SMPTE 305 (*Serial Data Transport Interface*) specifica la SDTI che utilizza l'infrastruttura SDI in modo compatibile sia dal punto di vista elettrico che della temporizzazione e organizza i dati video compressi tra i sincronismi di riferimento SAV ed EAV (figura 8).

I formati video compressi richiedono una velocità di trasferimento inferiore a quella necessaria per il video non compresso, cioè quella supportata dalla SDI e di conseguenza dalla SDTI. E' quindi possibile sfruttare tale eccesso di capacità per consentire trasferimenti a velocità superiori al tempo reale. Ad esempio i videoregistratori che adottano il formato D10 comprimono il segnale video a 50 Mbit/s ed è possibile effettuare riversamenti, fra due videoregistratori, a velocità doppia rispetto al tempo reale: ad esempio un contributo di un'ora può essere riversato in mezz'ora.

Alcuni standard SMPTE definiscono la mappatura di un'ampia gamma di formati di videore-

Fig. 8 - La struttura dati SDI prevede per il video (carico utile) 1440 parole da 10 bit fino ad una capacità massima di 200 Mbit/s nel caso di bit-rate complessivo di 270 Mbit/s e 1920 parole, consentendo fino a 270 Mbit/s per il payload, nel caso di bit-rate complessivo di 360 Mbit/s. Nel caso di utilizzazione per la SDTI, una intestazione (*header*) di 53 parole contiene gli indirizzi di sorgente e destinazione e la formattazione del carico utile, mentre il carico utile è organizzato in pacchetti dati denominati *item* (ne sono previsti quattro tipi: sistema, immagine, audio e ausiliari) ognuno dei quali può contentere fino a 255 elementi. Sono previsti diversi modi di trasferimento, non tutti necessariamente supportati dagli apparati: isocrono (i pacchetti sono agganciati alla struttura di trama SDTI), asincrono, a bassa latenza (struttura organizzata in sottopacchetti per consentire ritardi molto ridotti.

gistrazione nel formato SDTI. Esistono inoltre ulteriori specifiche, non SMPTE, per consentire la mappatura di altri formati. Di fatto SDTI può essere utilizzata fra coppie di apparati operanti secondo i formati: DVcam, DVCpro25, DVCpro50, D9 (Digital-S) e *Transport Stream* MPEG-2, Betacam SX, e HDcam, D10 (IMX), DVCPRO HD, HD-D5.

3.2 Interfaccia asincrona DVB-ASI

E' l'interfaccia definita dal DVB [6] per consentire il trasferimento del *Transport Stream* MPEG-2 (figura 9) in modo elettricamente compatibile con la SDI (collegamenti unidirezionali, a 800 mV p-p, 270 Mbit/s, lunghezza del cavo, di qualità opportuna ed equalizzato, fino a 300 m).

ASI è l'acronimo di *Asynchronus Serial Interface*, esistono anche una interfaccia sincrona parallela (DVB-SPI) e una seriale (DVB-SSI).

Si è visto che nell'interfaccia SDI esiste una relazione fissa tra la temporizzazione dei campioni video (27 MHz) ed il clock (270 MHz), quindi SDI è intrinsicamente una interfaccia sincrona.

Nel caso di SDTI e ASI, però, si trasporta un segnale compresso ed in questo caso può esserci ancora una relazione di sincronismo tra l'informazione video e il clock, ma spesso i sincronismi video sono indipendenti dal clock ricavabile dal flusso binario e sono invece ricavabili da opportune informazioni (*program clock reference*) contenute nel flusso di dati.

4. Interfaccia seriale per video ad alta definizione (HD-SDI)

Per l'alta definizione attualmente sono utilizzati soprattutto due formati d'immagine: HD-CIF previsto dalla Rac. BT.709 (1080 righe per quadro e 1920 pixel per riga) e quello previsto dalla Rac. BT.1543 (720 righe per quadro e 1280 pixel per riga) [2]. Il primo formato è oggi usato principalmente, in ambito televisivo, per la ripresa con scansione interlacciata, mentre la rispesa in formato progressivo trova applicazione soprattutto nell'ambito del cinema elettronico. Il secondo formato è previsto solo nella modalità di ripresa con scansione progressiva e per frequenze di immagine a 59,94 Hz, 30 Hz e 60 Hz, anche se sono stati sviluppati apparati operanti anche a 50 Hz.

In tabella 1 sono riassunti i bit-rate richiesti per le principali combinazioni di formato d'immagine e frequenza di ripetizione d'immagine.

Nel caso dei formati 1080i e 720p è sufficiente un bit-rate inferiore a 1,5 Gbit/s ed una apposita interfaccia seriale specificata dalla norma SMPTE 292M (*Bit-Serial Digital Interface for High Definition Television*) definisce infatti una interfaccia seriale operante a 1,485 Mbit/s (per i formati a 60 Hz, 50 Hz, 30 Hz, 25 Hz e 24 Hz) e a 1,485/1,001 Mbit/s (per i formati a 59,94 Hz, 29,97 Hz e 23,98 Hz, frequenze di ripetizione d'immagine compatibili con il sistema NTSC).

Nei casi in cui la capacità di 1,5 Gbit/s non sia sufficiente, per supportare i formati che richiedono bit-rate più elevati (1080p, 4:2:2, 10 bit a 60 Hz, 59,94 Hz e 50 Hz oppure RGB, 4:4:4, a 12 bit), la norma SMPTE 372M (*Dual Link 292M Interface for 1920 x 1080 Picture Raster*) specifica un'interfaccia con una coppia di connessioni (*dual link*) consistente in due interfacce 292M in parallelo.

Tab. 1 - Bit-rate tipici per interfacce seriali HD

Formato	Scansione	Numero di righe attive per quadro	Numero di pixel per riga	Bit-rate [Gbit/s]
1080p60	progressivo	1080	1920	2,97
1080p59.94				2,97/1,001
1080p50				2,97
1080p25				1,485
1080i60	interlacciato			1,485
1080i59,94				1,485/1,001
1080i50				1,485
720p60	progressivo	720	1280	1,485
720p59,94				1,485/ 1,001

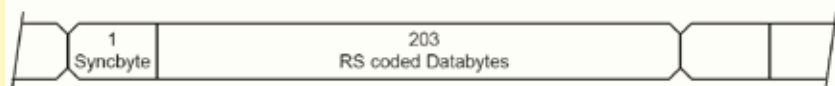
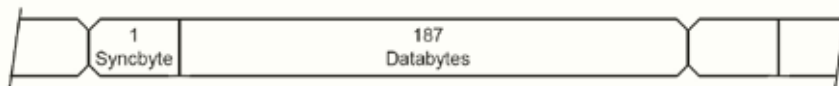
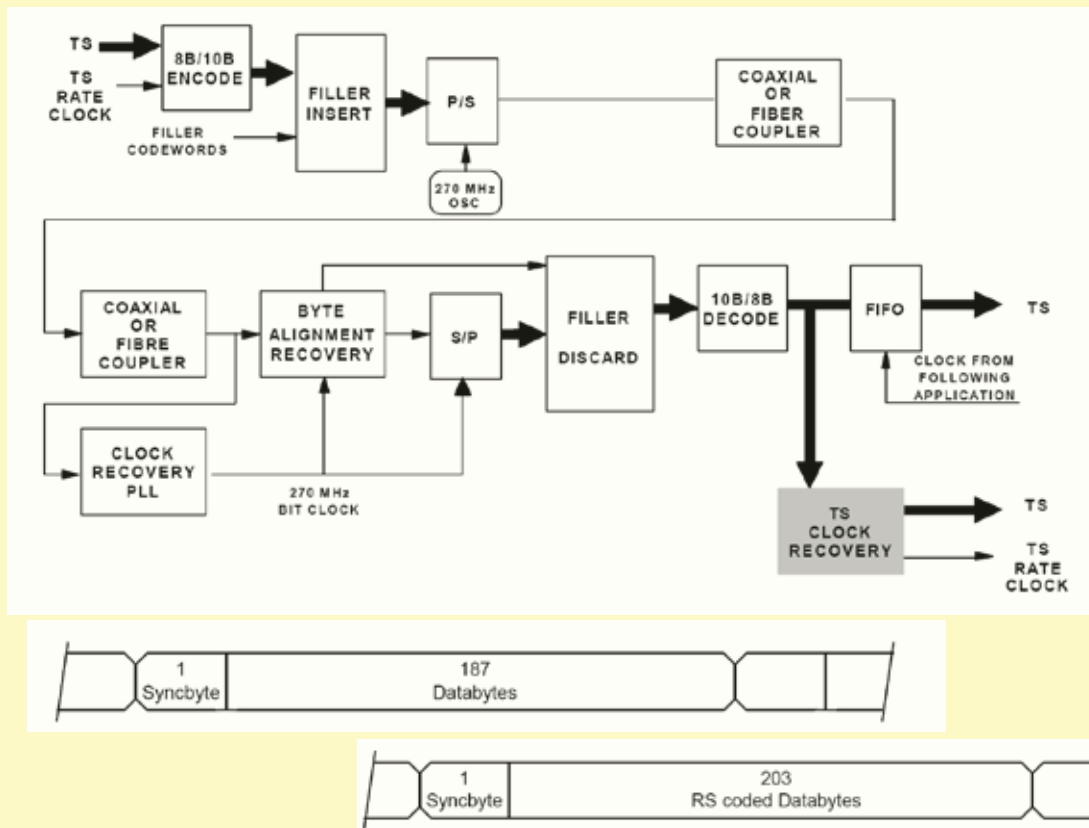
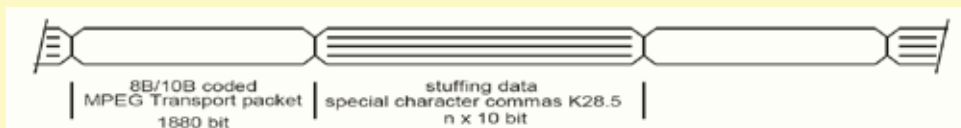



Fig. 9 - Esempio di applicazione dell'interfaccia DVB-ASI.

I pacchetti a lunghezza fissa che costituiscono il *transport stream* MPEG-2 comprendono 188 byte o 204 byte, nel caso siano protetti con il codice Reed Salomon. Il Pacchetto di Trasporto è costituito da una Header di 4 byte, il primo di sincronismo, e da un carico utile di 184 byte, per un totale di 188 byte: tale lunghezza fu scelta per ottenere una compatibilità con la struttura ATM (ciascuna cella ATM è costituita da 5 byte per la header, 1 byte di servizio e 47 byte di carico utile, l'equivalente in carico utile di 4 celle ATM, 4 x 47 byte, corrisponde quindi esattamente ai 184 byte di carico utile di un pacchetto del *Transport Stream*).

8B information Character	0	1	0		0	0	1	1	1		
10B transmission Character RD+	1	1	1	0	0	0		0	1	0	1
10B transmission Character RD-	0	0	0	1	1	1		0	1	0	1

I byte sono codificati mediante un codice a gruppo che associa 10 bit ogni byte (8B/10B), in modo da consentire la rigenerazione del clock la rilevazione della presenza di errori; il sincronismo è ottenuto mediante una parola da 10 bit non compresa fra quelle generate dal codice.

I pacchetti di dati video possono essere forniti sia come burst continui di byte, oppure come byte isolati, a ciascun byte (nell'esempio 0100 0111) viene associata una di due possibili parole da 10 bit a seconda del valore del parametro RD (*Running Disparity*) che determina il rapporto tra il numero di zeri e uni durante la trasmissione. RD viene determinato in base al rapporto calcolato nel sub-block precedente.

Poiché la soluzione con due connessioni pone problemi pratici rilevanti, recentemente è stata definita (SMPTE 424M, *3 Gb/s Signal/Data Serial Interface*) una interfaccia a 2,97 Gbit/s che consente l'uso di un solo cavo (figura 10).

In tabella 2 sono indicate, a titolo d'esempio, le distanze raggiungibili, con cavo coassiale, mediante SDI e HD-SDI. Queste interfacce trovano applicazione nell'ambiente di produzione, per la televisione o per il cinema.

Altre norme, generalmente specificate da consorzi di produttori di apparati, si applicano agli apparati consumer: decoder, riproduttori, schermi e proiettori.

Tab. 2 - Distanza di trasmissione calcolata per cavi coassiali del tipo 1694F della Belden, il costruttore specifica che i valori reali sono in genere migliori.

Applicazione	bit rate [Mbit/s]	Norme	m
NTSC composito	143	SMPTE 259M Annex A	482
PAL composito	177,3	SMPTE 259M Annex B	433
4:2:2 componenti a 4:3	270	ITU-R BT.656 SMPTE 259M	335
4:2:2 componenti a 16:9	360	ITU-R BT.656 SMPTE 259M	293
4:4:4 componenti a 16:9	540	SMPTE 344M	229
HDTV	1485	SMPTE 292M	88
HDTV scansione progressiva	2970	SMPTE 424M	58

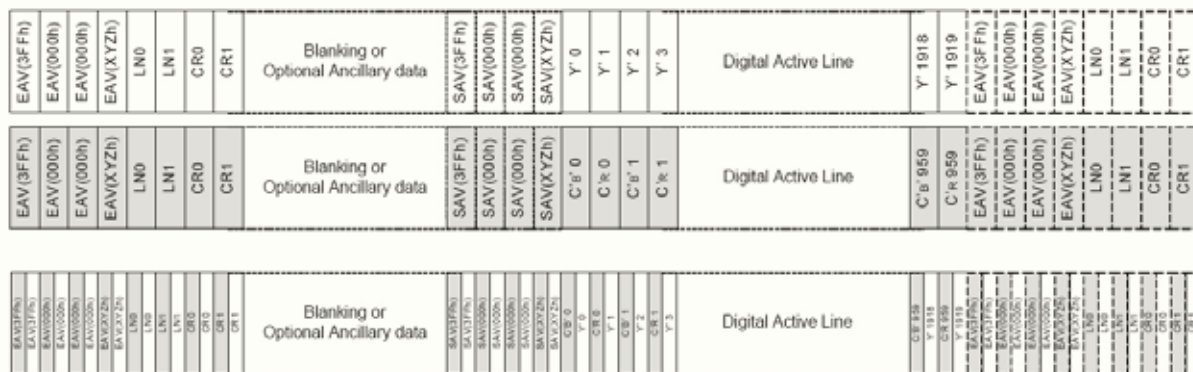



Fig. 10 - L'intefaccia a 3 Gbit/s (SMPTE 424M) prevede che il flusso seriale sia ottenuto a partire da due flussi, costituenti una interfaccia virtuale, di parole da 10 bit. Ciascuno dei due flussi è costituito da quattro aree: EAV e riferimento temporale, intervallo di cancellazione di riga, SAV e riferimento temporale, riga attiva (video o ancillary data). EAV e SAV sono costituite da quattro parole come indicato in figura 4, sono entrambe seguite da due parole che indicano il numero di riga e da due parole per rivelare eventuali errori (CRC).
Le parole di 10 bit costituenti i due flussi dell'interfaccia virtuale (in alto in figura) sono intercalate per formare il multiplex relativo all'interfaccia parallela riprodotto in basso in figura. I dati sono successivamente serializzati, con il bit meno significativo (LSB) di ciascuna parola trasmesso per primo. Il flusso complessivo ha un bit-rate pari a 2,97 Gbit/s (o 1,97/1,001 Gbit/s se la frequenza di quadro è quella NTSC). Lo schema di codifica di canale è NRZI con *scrambler* ed i polinomi generatori utilizzati sono gli stessi adottati per la SDI (figura 7). Nel caso di collegamento mediante cavo coassiale a 75 ohm e connettore BNC, il segnale ha un'ampiezza di 800 mV ±10%, dc offset 0,0 V ±0,5 V.

5. Dalla SCART alla HDMI

5.1 SCART

Nel 1977 fece la sua apparizione il connettore SCART (*Syndicat des Constructeurs d'Appareils Radiorécepteurs et Téléviseurs*) [5], noto anche come *Peritel* e normalizzato per consentire l'interconnessione fra gli apparati audiovisivi (TV, VCR e, successivamente, DVD e console per i giochi) permettendo di trasferire i segnali video analogici RGB e compositi (dal 1980 anche S Video) e audio stereo.

5.2 DVI

La DVI (*Digital Visual Interface*) è un'interfaccia sviluppata nel 1999 [6] per consentire la connessione anche in formato digitale di monitor a pannelli piatti e proiettori ai PC. Una connessione singola DVI consiste di quattro doppini (*twisted pair*) per il rosso, verde, blu e il clock e consente la trasmissione di 24 bit per ciascun pixel. Con una sola connessione a 60 Hz si può avere una risoluzione massima di 2,6 Mpixel; nel caso non sia sufficiente si può utilizzare una seconda connessione (sempre supportata dallo stesso connettore) per aumentare la banda oppure il numero di bit. Il connettore può ospitare anche i piedini per trasferire il video analogico, secondo lo standard VGA (figura 11).

La versione video è stata sviluppata per consentire anche l'interconnessione di apparati HDTV ai display.

5.3 HDMI

L'interfaccia HDMI (*High-Definition Multimedia Interface*) ha, per quanto riguarda la connessione digitali, caratteristiche simili alla DVI, infatti sono reperibili cavi dotati di entrambi i connettori (figura 12), ma è stata sviluppata da un consorzio di produttori (www.hdmi.org) specificatamente per il mercato consumer HDTV (figura 13). La massima velocità di trasferimento video

Fig. 11 - I connettori DVI possono essere di tipo DVI-I (supportano sia il segnale digitale che quello analogico) per singola connessione (*single-link*) o doppia connessione (*dual-link*). I DVI-D sono solamente per collegamenti digitali e i DVI-A solamente per collegamenti analogici.

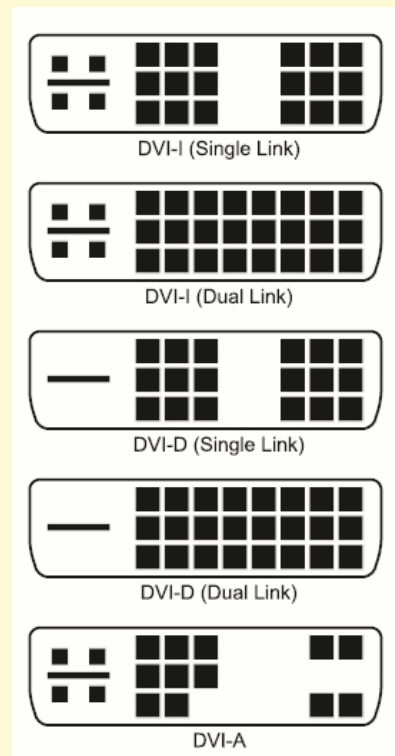



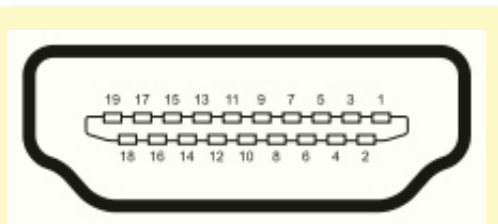
Fig. 12 - Cavo di interconnessione DVI (maschio) a sinistra e HDMI (maschio) a destra.

Pin	Signal Assignment	Pin	Signal Assignment
1	TMDS Data2+	2	TMDS Data2 Shield
3	TMDS Data2–	4	TMDS Data1+
5	TMDS Data1 Shield	6	TMDS Data1–
7	TMDS Data0+	8	TMDS Data0 Shield
9	TMDS Data0–	10	TMDS Clock+
11	TMDS Clock Shield	12	TMDS Clock–
13	CEC	14	Reserved (N.C. on device)
15	SCL	16	SDA
17	DDC/CEC Ground	18	+5 V Power
19	Hot Plug Detect		

Fig. 13 - connettore HDMI tipo A, da 19 contatti (quello di tipo B ha 29 contatti). Il canale TMDS consente, per il video: velocità da 25 a 340 Mpixel/s, 4:4:4, RGB e YC_BC_R (da 8 a 16 bit per componente) e 4:2:2 (fino a 12 bit per componente). HDMI supporta 1080p fino a 120 Hz. Per l'audio: fino ad 8 canali, frequenza di campionamento: 32 kHz, 44,1 kHz, 48 kHz, 88,2 kHz, 96 kHz, 176,4 kHz, 192 kHz. Il canale DDC permette alla sorgente di interrogare il dispositivo di destinazione sulle proprie caratteristiche.
Il canale CEC (*Consumer Electronics Control*), opzionale, è utilizzabile per funzioni di controllo remoto.

era di 165 Mpixel/s, sufficiente per il formato HDTV 1080p o per UXGA (1600x1200), ma l'attuale versione 1.3 ha portato tale velocità fino al massimo di 340 Mpixel/s (per il tipo A, il doppio per il tipo B).

5.4 HDCP

Il termine HDCP (vedere riquadro) non ci si riferisce ad una interfaccia, bensì a un sistema di protezione dei contenuti che transitano sulle connessioni DVI e HDMI per evitare usi impropri.

HDCP e protezione dei contenuti

HDCP (*High-Bandwidth Digital Content Protection*) indica un sistema di gestione dei diritti DRM (*Digital Rights Management*) sviluppato da Intel Corporation e che applica la cifratura del segnale che transita sulle connessioni DVI e HDVI per evitare usi impropri. Le specifiche HDCP sono proprietarie e i produttori di apparati devono richiedere una licenza per realizzare dispositivi che ne facciano uso. Ad ogni modello di dispositivo è assegnato un insieme di 40 chiavi, ciascuna di 56 bit, che grazie ad un processo di autenticazione permette alla coppia di apparati interconnessi di utilizzare un sistema di criptaggio nello scambio dei dati. I sistemi HD-DVD e Blu-Ray Disc prevedono che i produttori di dischi ottici possano impostare un *flag* per consentire l'uscita in alta definizione solo in forma criptata secondo HDCP. Solo un display connesso in grado di gestire il protocollo HDCP, e quindi di garantire che i dati non siano piratati, visualizza la massima definizione, altrimenti l'uscita video è fornita in modo non criptato, ma la definizione viene ridotta a 960x540p. In questo modo i produttori di contenuti possono impedire la realizzazione di copie illegali, ma identiche, dei film in alta definizione. HDCP è una delle caratteristiche richieste dalla EICTA (*European Industry Association for Information Systems*) a partire dal gennaio 2005, per poter identificare e commercializzare i display come *HD ready*. Per molte ragioni viene messa in dubbio l'efficacia della protezione attuabile mediante HDCP. I produttori sembrano orientati, almeno nei primi tempi, a non impostare il flag previsto per i supporti ottici, poiché la maggior parte dei display già in uso non sono abilitati all'uso di HDCP e quindi non potrebbero visualizzare al meglio i prodotti HD, anche quelli distribuiti legalmente. Occorre inoltre notare che, nel caso di diffusione, per esempio via canale satellitare o terrestre, del programma HDTV, la tratta meno sicura non è quella relativa alla connessione fra il STB e lo schermo, attuata mediante interfaccia DVI e HDMI, bensì il *Transport Stream,* che, avendo un bit-rate inferiore ai 20 Mbit/s, è più facilmente registrabile, per poi essere riprodotto senza ulteriori vincoli e senza ulteriore perdita in qualità e definizione. Infine, già nel 2001, ancora prima dell'adozione commerciale del prodotto, fu messo in evidenza il fatto che il sistema di protezione non era sicuro e poteva essere aggirato: dal 2005 vi sono aziende che hanno sviluppato dispositivi che operano come filtri posti nel percorso fra i due apparati interconnessi ed eliminano la protezione (ulteriori informazioni su http://en.wikipedia.org/wiki/HDCP).

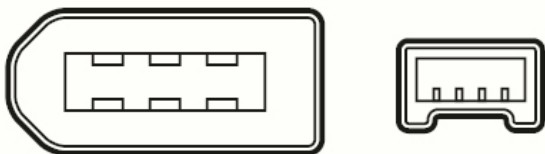
6. Interfacce per computer

Esistono numerose interfacce usate in ambito professionale per trasferire il video in ambito informatico. La più diffusa è denominata FireWire (da Apple), i.Link (da Sony) e IEEE 1394.

E' un'interfaccia bidirezionale utilizzata a partire dal 1995 e costituita da due doppini (*twisted pair*) ed un doppino opzionale per l'alimentazione. Il connettore è a 4 o 6 piedini (figura 14).

Nell'applicazione più semplice supporta la comunicazione fra dispositivi a 100, 200 o 400 Mbit/s. Possono essere interconnessi fino a 63 periferiche utlizzando una struttura di rete a hub. La specifica 1394b supporta fino a 900 Mbit/s con un connettore a 9 piedini e collegamenti in fibra ottica fino a 100 m e 3,2 Gbit/s.

SMPTE 396M ha definito il metodo per trasportare il video in formato DV, ma non è comunque garantita la compatibilità completa fra dispositivi che supportano lo standard IEEE 1394 perché esistono vari protocolli proprietari per trasportare audio, video e segnali di controllo.

Fig. 14 - Cavo IEEE 1394 con un connettore a 6 piedini e l'altro a 4 piedini.

Bibliografia

1. M. Barbero, N. Shpuza: "Le origini del video digitale (la raccomandazione ITU-R BT.601)", Elettronica e Telecomunicazioni, aprile 2003.

2. M. Barbero, N. Shpuza: "I formati HDTV (le raccomandazioni ITU-R BT.709 e BT.1543)", Elettronica e Telecomunicazioni, aprile 2005.

3. Rec. ITU-R BT.601-5: “Studio Encoding Parameters of Digital Television for Standard 4:3 and Wide-Screen 16:9 Aspect Ratios” (1982-1986-1990-1992-1994-1995)

4. Rec. ITU-R BT.656-4: “Interfaces for Digital Component Video Signals in 525-line and 625-line Television Systems operating at the 4:2:2 Level of Recommendation ITU-R BT.601-5 (Part A)”, (1986-1992-1994-1995-1998)

5. Rec. ITU-R BT.1367 - Serial Digital Fiber Transmission Systems for Signals Conforming to Recommendations ITU-R BT.656, BT.799 e BT.1120).

6. ETSI TR 101 891 - Digital Video Broadcasting (DVB); Professional Interfaces: Guidelines for the implementation and usage of the DVB Asyncronuous Serial Interface (ASI), v1.1.1 (2001-02)

7. CENELEC EN 50083-9 - Cabled distribution systems for televisione, sonud and interactive multimedia signals. Part 9: Interfaces for CATV/SMATV headends and similar professional equipment for DVB/MPEG-2 transport streams.

8. Digital Visual Interface, rev. 1.0, 2 aprile 1999, www.ddwg.org

Alla Fiera di Vicenza si è tenuta, dal 28 al 30 settembre 2006, la 13a edizione di SAT Expo.

SAT Expo è vetrina di riferimento per le comunicazioni via satellite e per la TV digitale terrestre, lo sponsor ufficiale è Eutelsat.

Nello stand Rai erano presenti alcuni ricercatori del Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica per fornire informazioni sulle tecnologie e servizi quali la Televisione Digitale Terrestre e la HDTV.

Sono stati inoltre invitati a tenere i seminari "Tecniche stereofoniche di ripresa e uno sguardo al 3D Sound (dr. Leonardo Scopece) e "HDTV - concetti, formati e tecnologie" (ing. Massimo Visca).

Il Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica era presente nello stand della Rai a Expo.bit 2006, il Salore Euromediterraneo dell'ICT tenuto a Catania dal 23 al 26 novembre.

Nello stand erano effettuate dimostrazioni di immagini ad alta definizione e di applicazioni di T-government mediante diffusione digitale terrestre a livello regionale.